



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO Y
MATERIAL MEDIANTE DIGESTIÓN
ANAEROBIA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS QUE SE
PRODUCEN EN EL BARRIO MORAVIA -
MEDELLÍN**

Autor

Joe Sánchez Marín

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019



Aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en el barrio Moravia - Medellín

Joe Sánchez Marín

Trabajo de investigación como requisito para optar al título de:
Magíster en Ingeniería Ambiental

Director

Carlos Alberto Peláez Jaramillo – PhD. Química

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2019.

AGRADECIMIENTOS

Al director de este trabajo de investigación, el profesor Carlos A. Peláez Jaramillo, por su apoyo, confianza, enseñanza y acompañamiento.

Al Ingeniero Carlos Andrés Uribe Trujillo, por su acompañamiento y guía en el desarrollo de todas las fases de este proceso.

A Alejandro Ruíz, Andrea Monroy, Yoni Zapata y demás integrantes de la línea de aprovechamiento energético del GIEM por su apoyo y orientación en el desarrollo de este estudio.

A la Secretaría de Medio Ambiente de la Alcaldía de Medellín, quienes apoyaron con los recursos y permisos necesarios para la ejecución de este proyecto.

Al equipo de profesionales del proyecto de habilitación ambiental del Morro de Moravia, ya que con su apoyo desde sus funciones, permitieron realizar este proceso en todas sus fases.

A todo el equipo de jardineros y oficiales del proyecto de habilitación ambiental del Morro de Moravia, por su compromiso, apoyo y dedicación desinteresada en el desarrollo de todas las fases de este proyecto; han sido una pieza clave para poder llevar a cabo todos los objetivos planteados.

A la comunidad del barrio Moravia, que de una u otra forma han contribuido para que este tipo de procesos sea viable y genere aceptación en el barrio.

A mi familia, amigos y demás personas que me han acompañado en este proceso brindándome su apoyo.

Tabla de contenido

Resumen	1
1. Introducción.....	3
2. Objetivos	6
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
3. Marco teórico	7
3.1 Generalidades de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)	7
3.2 Digestión anaerobia	9
3.2.1 Bioquímica de la digestión anaerobia	9
3.2.2 Principales variables que influyen en el proceso de digestión anaerobia	11
3.2.3 Digestor anaerobio	14
3.3 Potencial Bioquímico Metanogénico - PBM	17
3.4 Digestión anaerobia en el aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos	17
3.5 Coproductos del proceso de digestión anaerobia.....	22
4. Metodología	26
4.1 Identificación de los generadores de residuos sólidos orgánicos en el barrio Moravia	27
4.1.1 Aplicación de encuesta a los potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos	30
4.2 Caracterización y aforo de los residuos sólidos orgánicos.....	30
4.3 Determinación del potencial bioquímico metanogénico de los residuos sólidos orgánicos generados en el barrio Moravia.....	31
4.3.1 Obtención de las muestras de residuos sólidos orgánicos	31
4.3.2 Montaje de las pruebas de Potencial Bioquímico Metanogénico – PBM ...	34
4.4 Implementación del sistema de digestión anaerobia a escala piloto para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del barrio Moravia	38
4.4.1 Diseño e implementación del sistema.....	38
4.4.2 Cálculo de parámetros operacionales.....	49
4.4.3 Puesta en marcha y operación del sistema	50
4.4.4 Monitoreo del sistema	52

4.5 Potencial de aprovechamiento energético y material.....	53
5. Resultados	55
5.1 Identificación de los generadores de residuos sólidos orgánicos en el barrio Moravia	55
5.1.1 Resultados de la aplicación de la encuesta a los potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos	60
5.1.2 Caracterización y aforo de los residuos orgánicos.....	70
5.2 Caracterización fisicoquímica de los residuos orgánicos	76
5.3 Potencial Bioquímico Metanogénico – PBM.....	81
5.4 Implementación del sistema de digestión anaerobia a escala piloto	87
5.4.1 Parámetros operacionales	90
5.4.2 Seguimiento y monitoreo del sistema.....	92
5.5 Coproductos obtenidos en el proceso de digestión anaerobia	104
5.5.1 Aprovechamiento energético del biogás	104
5.5.2 Caracterización del compostaje	106
5.5.3 Caracterización del efluente.....	107
Conclusiones	109
Recomendaciones	111
Bibliografía.....	113

Listado de tablas

Tabla 1. Clasificación de los tipos de digestores anaerobios	14
Tabla 2. Comparación de los diferentes tipos de biodigestores.....	16
Tabla 3. Estudios reportados para sistemas de digestión anaerobia en el tratamiento de la FORSU.....	20
Tabla 4. Sectores que confluyen en el barrio Moravia	28
Tabla 5. Tipos de residuos sólidos orgánicos definidos para caracterización y aforo	31
Tabla 6. Métodos analíticos de la caracterización fisicoquímica de las muestras....	38
Tabla 7. Características de los reactores metanogénicos	44
Tabla 8. Ecuaciones para determinar los parámetros de operación en el sistema de digestión anaerobia.....	50
Tabla 9. Parámetros monitoreados en el sistema	53
Tabla 10. Potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos identificados en el barrio Moravia.....	56
Tabla 11. Puntos seleccionados por sector.....	70
Tabla 12. Resultados de la caracterización de residuos sólidos orgánicos en los puntos seleccionados	71
Tabla 13. Resultados del aforo de residuos sólidos orgánicos en los puntos seleccionados.....	74
Tabla 14. Resultados caracterización fisicoquímica de las muestras en esta sólido	76
Tabla 15. Resultados caracterización fisicoquímica de las mezclas de residuos sólidos orgánicos	77
Tabla 16. Resultados caracterización fisicoquímica del percolado extraído de las mezclas.....	79
Tabla 17. Resultados caracterización fisicoquímica del inóculo utilizado en el PBM	80
Tabla 18. Resultados caracterización fisicoquímica de las mezclas formuladas del PBM	80
Tabla 19. ANOVA para Producción de biogás por Mezcla	86
Tabla 20. ANOVA para % de Metano por Mezcla	87
Tabla 21. Lista de equipos y adecuaciones realizadas para la implementación del sistema de digestión anaerobia.....	88
Tabla 22. Parámetros operaciones considerando el TRH.....	91
Tabla 23. Condiciones de operación del sistema bajo el caudal de alimentación en este estudio.....	91
Tabla 24. Caracterización fisicoquímica del inóculo utilizado los reactores metanogénicos	92
Tabla 25. Variables de estabilización del sistema	103
Tabla 26. Valores de referencia energético del biogás	104
Tabla 27. Cálculo de posibilidades de aprovechamiento calórico	105
Tabla 28. Cálculo de posibilidades de aprovechamiento eléctrico	105

Tabla 29. Características fisicoquímicas del compostaje.....	106
Tabla 30. Características fisicoquímicas del influente y efluente	107

Listado de figuras

Figura 1. Reacciones de la digestión anaerobia Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas	10
Figura 2. Equivalencias energéticas del biogás	23
Figura 3. Usos del biogás	24
Figura 4. Sectores del barrio Moravia	26
Figura 5. Metodología implementada	27
Figura 6. Zona de identificación de los potenciales generadores de residuos orgánicos dentro del barrio Moravia	29
Figura 7. Método del cuarteo aplicado a los residuos sólidos orgánicos	32
Figura 8. Esquema reactores batch	35
Figura 9. Esquema sistema de digestión anaerobia por etapas implementado y desarrollado por el GIEM	39
Figura 10. Ubicación de espacios en el Morro de Moravia Punto 1. Ubicación de Compostera – zona de recepción. Punto 2. Adecuación de camino. Punto 3. Zona de ubicación del sistema piloto de digestión anaerobia. Entre Punto 1 y Punto 2 Corredor del arte y la memoria. Entre Punto 2 y Punto 3 Adecuación de nuevo camino.....	40
Figura 11. Esquema de adecuación de cada reactor de hidrólisis	42
Figura 12. Dimensiones de los reactores de hidrólisis	42
Figura 13. Medidas de los reactores metanogénicos	45
Figura 14. Esquema de los reactores metanogénicos adecuados	45
Figura 15. Puntos de monitoreo del sistema	52
Figura 16. Ubicación de puntos del sector comercial, industrial y oficial identificados en recorridos por el barrio	59
Figura 17. Esquema del sistema de digestión anaerobia instalado – vista en planta	89
Figura 18. Esquema del sistema de digestión anaerobia instalado	89

Listado de gráficas

Gráfica 1. Cantidad de generadores por sector	58
Gráfica 2. Cantidad de generadores por subsector	58
Gráfica 3. Resultados encuesta sobre el tipo de residuos orgánicos generados	61
Gráfica 4. Resultados encuesta sobre la cantidad de residuos orgánicos producidos	62
Gráfica 5. Resultados encuesta sobre realización de procesos de separación en fuente	63

Gráfica 6. Resultados encuesta sobre el almacenamiento temporal de los residuos orgánicos	64
Gráfica 7. Resultados encuesta sobre el uso de los residuos sólidos orgánicos	65
Gráfica 8. Resultados encuesta sobre la frecuencia de recolección de los residuos	66
Gráfica 9. Resultados encuesta sobre el momento en que dispone los residuos para recolección.....	67
Gráfica 10. Resultados encuesta sobre presencia de inconvenientes por el manejo de los residuos	68
Gráfica 11. Resultados encuesta sobre la apreciación de los procesos de aprovechamiento de residuos orgánicos	69
Gráfica 12. Resultados encuesta sobre el interés de participación en un proceso de aprovechamiento de los residuos orgánicos	69
Gráfica 13. Porcentaje de generación por tipo de residuo sólido orgánico	75
Gráfica 14. Resultados de concentración de SV, ST y SF en las mezclas de residuos sólidos orgánicos	78
Gráfica 15. Producción de biogás acumulado para la mezcla 1	82
Gráfica 16. Producción de biogás acumulado para la mezcla 2.....	82
Gráfica 17. Producción de biogás acumulado para la mezcla 3.....	82
Gráfica 18. Producción de biogás acumulado para la mezcla 4.....	83
Gráfica 19. Producción de biogás acumulado para las cuatro mezclas	83
Gráfica 20. Gráfico de cajas y bigotes para la producción de biogás de las cuatro mezclas.....	85
Gráfica 21. Gráfico de cajas y bigotes para el porcentaje de metano de las cuatro mezclas.....	87
Gráfica 22. Alimentación de residuos orgánicos en la fase sólida y generación de digestato.....	93
Gráfica 23. Resultados del seguimiento a la Relación AGV/Alk.....	94
Gráfica 24. Resultados del seguimiento al pH.....	95
Gráfica 25. Resultados del seguimiento a los sólidos volátiles	97
Gráfica 26. Resultados del seguimiento a la relación SV/ST	97
Gráfica 27. Resultados del seguimiento a la DQO.....	99
Gráfica 28. Producción de biogás acumulado y porcentaje de metano durante el tiempo de monitoreo	101

Listado de imágenes

Imagen 1. Aplicación del método del cuarteo.....	32
Imagen 2. Aplicación del método del cuarteo.....	32
Imagen 3. Conformación de muestras de residuos sólidos orgánicos	33
Imagen 4. Adecuación de camas de percolación	34
Imagen 5. Extracción de percolado	34
Imagen 6. Conformación de reactores batch para prueba de PBM.....	35
Imagen 7. Baño maría de reactores batch en prueba PBM.....	35

Imagen 8. Medición de presión en pruebas PBM	36
Imagen 9. Almacenamiento del biogás generado en pruebas PBM	36
Imagen 10. Caracterización del biogás generado en pruebas PBM	36
Imagen 11. Centro de recepción de material orgánico - Compostera	40
Imagen 12. Adecuación de caminos carretables	41
Imagen 13. Zona de picado y ubicación de reactores de hidrólisis	41
Imagen 14. Picadora marca TR 200	41
Imagen 15. Proceso de picado de los residuos orgánicos	41
Imagen 16. Adecuación e instalación de los reactores de hidrólisis	42
Imagen 17. Adecuación e instalación de los reactores de hidrólisis	42
Imagen 18. Malla de soporte de residuos picados	43
Imagen 19. Alimentación de los reactores de hidrólisis	43
Imagen 20. Ubicación tanque pulmón	43
Imagen 21. Entrada de percolado al tanque pulmón	43
Imagen 22. Sistema de bombeo	44
Imagen 23. Adecuación interior de los reactores metanogénicos	45
Imagen 24. Construcción de los reactores metanogénicos	45
Imagen 25. Adecuación entrada de percolado y salida de biogás en los reactores metanogénicos	46
Imagen 26. Adecuación de los reactores metanogénicos	46
Imagen 27. Adecuación tubería en el tanque de almacenamiento de efluente	47
Imagen 28. Tanque de almacenamiento de efluente	47
Imagen 29. Sistema de limpieza del biogás	48
Imagen 30. Trampa de humedad	48
Imagen 31. Trampa de H₂S	48
Imagen 32. Conexión sistema de limpieza y medición del biogás	48
Imagen 33. Medidor de biogás	48
Imagen 34. Bolsa de almacenamiento de biogás	49
Imagen 35. Proceso de caracterización de residuos sólidos orgánicos	73
Imagen 36. Proceso de caracterización de residuos sólidos orgánicos	73
Imagen 37. Proceso de caracterización de residuos sólidos orgánicos	73
Imagen 38. Proceso de aforo de residuos sólidos orgánicos	74
Imagen 39. Proceso de aforo de residuos sólidos orgánicos	75
Imagen 40. Sistema de digestión anaerobia instalado	90

Resumen

Los residuos sólidos orgánicos corresponden a la fracción predominante de los residuos generados en entornos urbanos; estos pueden representar grandes problemáticas ambientales, económicas y sociales bajo modelos de gestión ineficientes, pero también, por sus características, presentan un alto potencial de aprovechamiento que logra traducirse en beneficios en diferentes entornos, entre ellos el urbano.

En este trabajo, se aplicó un modelo de aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia en un contexto urbano que presenta problemas asociados a la gestión de los residuos sólidos orgánicos; para tal fin, se desarrolló el estudio en el barrio Moravia – Medellín, donde existen carencias en cuanto al manejo y aprovechamiento de este tipo de residuos acorde a las características y necesidades del barrio.

En primera instancia, se llevó a cabo la identificación de los generadores potenciales de residuos sólidos orgánicos al interior del barrio, identificando 34 generadores potenciales pertenecientes en mayor porcentaje al sector comercial y en menor medida se presentan establecimientos asociados al sector institucional e industrial; el sector residencial no fue tenido en cuenta en este estudio debido a problemas asociados a la separación en la fuente de la fracción orgánica. Posteriormente, se aplicó una encuesta en los puntos identificados y con base en esta se seleccionaron los establecimientos más representativos y que presentaron condiciones óptimas para el desarrollo de las fases posteriores. Se llevó a cabo en estos establecimientos la caracterización y aforo de los residuos sólidos orgánicos generados, que en un 94% corresponden a restos de frutas, verduras y vegetales en estado fresco y en un 6% restos de comida procesada; el mayor aportante es el sector comercial. Seguidamente, se determinó en un periodo de 30 días a escala de laboratorio el Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM) de diferentes mezclas de los residuos orgánicos generados por los tres sectores, obteniendo valores entre $920,2 \pm 36$ ml biogás/g SV y $1011,5 \pm 64$ ml biogás/g SV, con un promedio de metano entre 53% y 60%, sin diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas.

Finalmente, se implementó en el Morro de Moravia con base en los procesos desarrollados por el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM), un sistema de digestión anaerobia a escala piloto en dos fases (sólido – líquido) y operado por etapas; este fue alimentado con los residuos orgánicos provenientes del barrio Moravia. El sistema fue monitoreado con las variables ST, SV, DQO, pH, relación AGV/Alk, producción de biogás y porcentaje de metano. Cuando se presentaron condiciones estables en la fase metanogénica, se logró llegar a una producción promedio de $950 \frac{L CH_4}{Kg SV}$, presentando el biogás condiciones favorables para un aprovechamiento calórico y eléctrico; sin embargo, se debe considerar el aumento de la alimentación del sistema en términos de carga orgánica, ya que de acuerdo al seguimiento de los parámetros y a la capacidad de este, puede soportar mayor carga a la alimentada en este estudio. Por otro lado, tanto el efluente obtenido de la operación del sistema como el digestato que corresponde a la fracción sólida

y que fue sometido posteriormente a procesos de compostaje, fueron caracterizados a la luz de la NTC 5167, obteniendo para el efluente un producto que no cuenta con los requerimientos estipulados en la norma para ser comercializado, pero con potencial para la formulación de abonos orgánico-minerales líquidos; para el caso del compostaje, se obtuvo un producto de buena calidad que representa una fuente óptima de aprovechamiento como abono orgánico de acuerdo con lo estipulado en la norma.

Palabras clave: FORSU, Digestión anaerobia, Aprovechamiento energético, Aprovechamiento material.

1. Introducción

El manejo y gestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), se ha convertido en un tema de interés prioritario a nivel mundial, no sólo por las problemáticas ambientales, sociales y económicas que se pueden derivar de su mala gestión, sino también por su alto potencial de aprovechamiento tanto energético como material bajo diferentes tecnologías. El rápido crecimiento y urbanización de las ciudades y por ende la alta generación de residuos sólidos urbanos, con la fracción orgánica representando el mayor porcentaje, ha atraído la atención sobre la gestión adecuada de estos, considerándose como uno de los mayores problemas ambientales urbanos en la actualidad [1]. Es de anotar, que la mayoría de problemáticas asociadas a la operación y gestión de los residuos sólidos urbanos y los rellenos sanitarios como sitio de disposición final, tiene que ver con la cantidad de residuos que van a parar a estos lugares, que conlleva a una disminución de su vida útil; esto finalmente es reflejo de la carencia de estrategias de aprovechamiento, reúso y optimización de los residuos [2].

En Colombia, por lo general la disposición final de residuos sólidos se hace en rellenos sanitarios, y aunque esta técnica está concebida para no causar peligro al ambiente o a la salud humana y seguridad pública, es posible que se presenten diferentes problemáticas, poniendo en duda su funcionamiento a la luz de la normatividad que los rige [3]. Se sabe hoy, que sitios aptos para tal fin escasean, y que además, el montaje y operación de estos es inductor de graves conflictos ambientales y sociales [4].

La fracción orgánica representa la mayor cantidad de los residuos sólidos urbanos, donde su manejo se ha centrado principalmente en la recolección, transporte y disposición final en los rellenos sanitarios, enterrándolos en suelos no productivos donde no logran reincorporarse al ciclo natural, y donde además, por sus procesos de descomposición generan gases y lixiviados con alta carga contaminante [4]. Este tipo de residuos por sus características físicas y químicas representan una fuente valiosa para el aprovechamiento energético y material a diferentes escalas, de donde se pueden obtener diferentes coproductos y beneficios, ayudando a la disminución de problemáticas ambientales y sociales y reduciendo los costos de operación en su gestión.

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que tiene como principal centro urbano la ciudad de Medellín, se generan en promedio 3200 ton diarias de residuos sólidos urbanos, donde cerca del 60% corresponde a la fracción orgánica. De esta, sólo el 2% es aprovechada, especialmente en la producción de compost. Esta estrategia de aprovechamiento se centra principalmente en un bajo porcentaje de urbanizaciones residenciales y tiene como meta la reducción de los residuos orgánicos que pueden llegar al sitio de disposición final [5]. Acorde con la meta trazada por la región en el PGIRS, se pretende incrementar el porcentaje de aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos disminuyendo su disposición final en el relleno sanitario; sin embargo, surge la necesidad de plantear modelos de gestión técnica y tecnologías que involucren un esquema de participación socio-ambiental en los contextos urbanos, que ayuden a incrementar los

indicadores de aprovechamiento del componente orgánico, con gran impacto positivo a nivel medio ambiental y sobre las comunidades [5].

A nivel urbano, la implementación de diferentes tecnologías para lograr un aprovechamiento in situ de los residuos orgánicos se hace cada vez más necesaria, aminorando costos de operación y creando un esquema de beneficio ambiental y económico pero sobre todo social, donde sean las comunidades las principales beneficiadas de este tipo de proyectos, al mismo tiempo que se crea apropiación por este tipo de iniciativas. Un objetivo primario, es el desarrollo sostenible, que implica la creación de una cultura tecnológica, de un nuevo lenguaje o de un nuevo paradigma, que priorice, para los residuos orgánicos en particular, los conceptos de valoración, recuperación, reciclaje, aplicación al suelo, aprovechamiento, gestión integral, cierre del ciclo de nutrientes, etc. [6]. Se deberá entonces, para el contexto de la ciudad, apuntar a crear infraestructura y estructuras organizativas para desarrollar nuevas soluciones económicamente viables y ambientalmente sostenibles, y crear una cultura tecnológica que valore los residuos orgánicos como recursos agronómicos y energéticos [7].

La digestión anaerobia ofrece una alternativa viable para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en entornos urbanos, siendo una tecnología económica, de bajo impacto ambiental y un medio importante para abordar los problemas asociados a la gestión de residuos, demanda de energía y fertilizantes orgánicos [8]. Esta tecnología viene consolidándose al redor del mundo debido a la preocupación emergente por el aprovechamiento de residuos, brindando múltiples beneficios ambientales y sociales [9]. Sin embargo, la adopción de esta tecnología en entornos urbanos dependerá de la disponibilidad de materias primas separadas en fuente y de implementar procesos sostenibles para el aprovechamiento de los coproductos generados [10]; por lo tanto, se hace necesario estudiar estas tecnologías en un entorno comunitario, evaluando la eficiencia técnica, viabilidad ambiental, social y económica de su implementación, como solución o alternativa al tratamiento in situ de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos [11].

En este trabajo, se ha implementado un proceso basado en digestión anaerobia para el aprovechamiento energético y material de residuos sólidos orgánicos generados en entornos urbanos; se ha seleccionado para el desarrollo de las pruebas e implementación de un sistema a escala piloto el barrio Moravia ubicado al norte de Medellín, que corresponde a uno de los más densamente poblados de la ciudad y que ha tenido su desarrollo ligado a una carente planificación urbana que ha conllevado a múltiples problemáticas sociales y ambientales. El barrio surge entorno al botadero a cielo abierto conocido como el Morro de Moravia, que operó oficialmente entre los años 1977 a 1984. Por las condiciones existentes al interior del barrio, el manejo y gestión de los residuos presenta precariedad tanto por la empresa de aseo como por la población que allí habita; estos son ubicados en gran medida y de manera inadecuada en puntos no autorizados, traduciéndose en amenazas no sólo para el medio ambiente sino también para la salud de sus habitantes. En esta zona, no se tienen registros de procesos que involucren el aprovechamiento de los residuos orgánicos; por lo tanto, y partiendo de las carencias del barrio, se pretende propiciar un modelo que pueda ser aplicado para la gestión y

aprovechamiento de la FORSU, integrando los diferentes sectores generadores y donde se obtengan coproductos que puedan cubrir los requerimientos tanto energéticos como materiales necesarios en algunas actividades que allí se desarrollan.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Implementar un modelo a escala piloto de aprovechamiento energético y material mediante digestión anaerobia para la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos producidos en el barrio Moravia – Medellín

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad y calidad de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos producidos en el barrio Moravia.
- Establecer a escala de laboratorio el potencial metanogénico de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos producidos en el barrio Moravia.
- Desarrollar a escala piloto un sistema de aprovechamiento energético y material para la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos producidos en el barrio Moravia.
- Caracterizar los coproductos del proceso de digestión anaerobia para su aprovechamiento.

3. Marco teórico

3.1 Generalidades de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)

Los residuos sólidos urbanos (RSU) o residuos sólidos municipales (RSM) son los residuos generados en el sector doméstico o residencial, institucional, comercial, mercados, limpieza urbana, parques y jardines y aquellos asimilables provenientes de actividades industriales [12]. Constituyen gran parte de los residuos que se generan en el mundo, lo que está ligado a la dinámica demográfica mundial [13]. Un gran porcentaje de los RSU corresponde a la fracción orgánica (FORSU) que incluye a los residuos biodegradables de origen vegetal y/o animal susceptibles de degradarse biológicamente. Hacen parte de este grupo generalmente restos de comida pre y posconsumo (procesada y sin procesar), residuos de frutas, verduras y vegetales, residuos del barrido urbano, residuos de poda [13].

La composición, características y generación de los residuos es variable y depende de factores como el hábitat, nivel de vida y costumbres alimenticias de la población, época del año, condiciones climáticas, actividad productiva, entre otros [14]. Se estima que a nivel mundial se generan aproximadamente 1.300 millones de toneladas por año de residuos sólidos urbanos y se infiere que a 2.025 se incrementa a 2.200 millones de toneladas. El contenido de residuos orgánicos es a nivel mundial de 46% [15]. En países desarrollados, la generación de residuos es mayor a la de países en vía de desarrollo y la composición de estos es igualmente variable; en Latinoamérica, la mayor proporción de residuos urbanos corresponde a la fracción orgánica, la cual se encuentre entre 50% a 70% [13].

En Colombia, la generación de residuos urbanos se calcula en 26.528 Ton/día, donde el 65% de su composición equivale a residuos sólidos orgánicos [16]; el medio de disposición final utilizado en mayor porcentaje son los rellenos sanitarios; el país cuenta con 1.102 municipios de los cuales 886 disponen en rellenos sanitarios, es decir el 81%, el 10,34% (114 municipios) en botaderos a cielo abierto; 4,26% (47 municipios) en celda transitoria, 1,27% (14 municipios) en celda de contingencia, 3,09% (34 municipios) en plantas de aprovechamiento y un 0,45% (5 municipios) en cuerpos de agua. La vida útil del 38% de los sitios de disposición final está entre los 0 y 3 años, el 26% entre 3 y 10 años, y el 36% mayor a 10 años [17].

En el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, que corresponde a uno de los principales centros urbanos del país, se genera cerca del 12% (3200 Ton/día) del total de residuos generados en Colombia, donde alrededor del 60% corresponde a la fracción orgánica, siendo el sector residencial el que constituye el aporte más significativo [18]. De los residuos orgánicos generados, solo el 2% es aprovechado y la cantidad restante es depositada en el relleno sanitario La Pradera [19].

De acuerdo con las cifras mencionadas, se puede apreciar que el componente principal de los RSU es la materia orgánica, la cual es relevante en cuanto a la definición de estrategias y opciones de tratamiento, aprovechamiento o disposición final. En países en vía de desarrollo los recursos son limitados lo que controla la implementación de estrategias

idóneas técnica y económicamente viables para el aprovechamiento de este tipo de residuos, por lo que los rellenos sanitarios constituyen una opción a corto y mediano plazo; esta solución ha sido cuestionada debido a las problemáticas socioambientales que genera y a la baja tasa de aprovechamiento que se puede dar [3, 20].

La fracción orgánica de residuos urbanos tiene asociados impactos significativos en todas las etapas de su gestión, lo cual ha llevado a incentivar diferentes estrategias que buscan mitigarlos [21]. La descomposición de la materia orgánica genera como subproductos gases y lixiviados que pueden ser nocivos para la salud humana y el ambiente cuando no se manejan adecuadamente; la constante acumulación y bajos niveles de aprovechamiento está propiciando problemas de espacio debido al requerimiento de rellenos sanitarios [22].

Las características y composición de la FORSU son claves para poder determinar algún tipo de aprovechamiento, presentando una heterogeneidad física y química que permiten darles un valor agregado [23]; por lo general, este tipo de residuos urbanos presenta un alto índice de carbono-nitrógeno y un alto contenido de humedad, lo que hace que presenten un alto potencial de aprovechamiento para la generación de biogás, producción de fertilizantes y acondicionadores para el suelo [24]. Estas prácticas relacionadas con el manejo de la FORSU son prioritarias dentro de las ciudades y municipios, evitando la generación de problemáticas a causa de la mala gestión de estos [25].

El aprovechamiento de los residuos está definido como un proceso mediante el cual hay reincorporación de los materiales al ciclo económico y productivo de forma eficiente, mediante tecnologías que conlleven a beneficios sanitarios, económicos y ambientales [26]. Son diferentes las tecnologías implementadas para el tratamiento y aprovechamiento de la FORSU y su idoneidad depende de la zona geográfica, la legislación vigente, la aceptación social, calidad de los productos y costos asociados [12].

Actualmente, los procesos biológicos son considerados como los más efectivos para el tratamiento y aprovechamiento de compuestos con alta carga orgánica como la FORSU, siendo una alternativa viable ya que son sistemas de bajo costo y simplicidad de manejo [27]. Estos se llevan a cabo en presencia de oxígeno (aerobios) o en su ausencia (anaerobios); dentro de las tecnologías aerobias más implementadas se encuentra el compostaje y la lombricultura o vermicultura y, por otro lado, se tienen los sistemas de digestión anaerobia.

Aunque la mayoría de las aplicaciones de aprovechamiento de la FORSU se realizan con tecnologías separadas (aerobias o anaerobias), en la actualidad ambos sistemas van de la mano y son complementarios, ya que los coproductos sólidos generados en sistemas de digestión anaerobia pueden ser estabilizados posteriormente bajo sistemas aeróbicos como el compostaje, donde por acción de microorganismos que actúan sobre la materia orgánica bajo condiciones controladas y diferentes fases de temperatura, se genera un producto final libre de patógenos [28]; esto representa múltiples ventajas ya que se tiene mayor potencial para el aprovechamiento de los diferentes coproductos que se pueden generar del tratamiento de la FORSU. Así pues, la digestión anaerobia permite tanto la producción de biogás con oportunidad de aprovechamiento energético y coproductos que pueden ser estabilizados mediante otras tecnologías aerobias para su aprovechamiento material [29].

3.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es entendida como una serie de procesos biológicos donde diferentes microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno en un proceso multietapa y de reacciones paralelas [30]. Es considerada como un sistema bifásico compuesto por una fase no metanogénica y otra metanogénica; en la primera las bacterias anaerobias llevan a cabo procesos de fermentación para la transformación de los sustratos en compuestos solubles como acetatos ($C_2H_3O_2R$), dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2), los cuales son usados en una segunda fase por las bacterias metanogénicas [31]. Durante la degradación anaerobia se transforma la materia orgánica en una mezcla de gases conocida como biogás, cuyos principales componentes son el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), aunque puede incluir trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua, amoníaco (NH_3) y otros componentes dependiendo del sustrato de origen [32]. La generación de biogás a partir de la digestión anaerobia ofrece ventajas significativas sobre otras formas de producción de bioenergía, pudiendo ser aprovechado con diferentes tecnologías para la conversión a energía eléctrica, en motores de combustión, en lámparas de iluminación o en quemadores y calderas [24, 33]. Otro de los coproductos que se obtienen a partir de la digestión anaerobia corresponde a una mezcla de materiales orgánicos conocido como digerido o bio-lodo, que corresponde a la materia orgánica estabilizada siendo un material rico en nutrientes y minerales y que puede ser utilizado para la recuperación de suelos o como materia prima para la producción de compost [34].

3.2.1 Bioquímica de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso sumamente complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas, caracterizados por contar con diferente velocidad de crecimiento, acción y sensibilidad a cada compuesto inhibidor que interviene [35]. El proceso se da a través de una serie de reacciones metabólicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis constituyendo cuatro etapas; en la figura 1 se presenta un esquema del proceso.

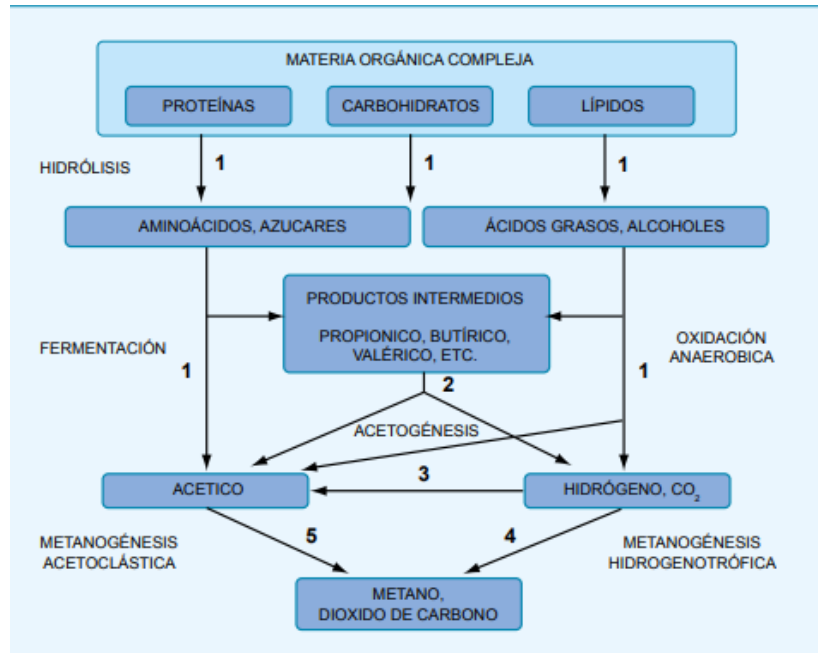


Figura 1. Reacciones de la digestión anaerobia

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas

Tomado de: (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991) citado por: [36]

- Hidrólisis:** Corresponde a la primera etapa en los procesos de digestión anaerobia llevada a cabo por bacterias hidrolíticas acidogénicas, donde los polímeros complejos como polisacáridos, proteínas y lípidos son hidrolizados por acción de enzimas extracelulares convirtiéndolos en moléculas más simples (azúcares, aminoácidos y grasas) y así poder ser disueltas por el medio acuoso que las rodea [13]. En esta fase la materia orgánica se hidroliza en compuestos solubles para ser utilizada directamente por los microorganismos, siendo estos compuestos en adelante susceptibles de emplearse como la fuente de materia y energía [21]. La hidrólisis se considera por muchos autores como la limitante de la velocidad en el proceso de digestión anaerobia de toda la gama de residuos orgánicos, especialmente los que cuentan con un alto contenido de sólidos, debido a que las enzimas hidrolíticas no actúan siempre en la superficie de los sustratos sólidos [37]. Por tal motivo, diversos pretratamientos físicos, químicos y enzimáticos se consideran necesarios para aumentar la solubilidad del sustrato y acelerar la velocidad de biodegradación de los residuos sólidos orgánicos [38].
- Acidogénesis:** Los compuestos formados en la etapa hidrolítica son transformados mediante un proceso de fermentación a productos intermedios, dando como resultado una mezcla de dióxido de carbono, hidrógeno, ácido acético, ácidos grasos volátiles, ácidos grasos de cadena larga, amoníaco, alcoholes y pequeñas cantidades de otros metabolitos, que son utilizados en las fases posteriores [39].

Las bacterias responsables de esta fase son las bacterias acidogénicas, donde se encuentran bacterias anaerobias facultativas [40].

- *Acetogénesis:* Los productos que se obtienen en la fase acidogénica sirven de sustrato para los microorganismos activos en esta tercera fase, formando ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono que son los principales precursores del metano [41]. Algunos productos de la fermentación son metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, otros son transformados en productos más sencillos a través de las bacterias acetogénicas [35].
- *Metanogénesis:* Es la etapa final donde se produce metano por la actividad de las arqueas metanogénicas a partir de los productos finales de la acetogénesis y de algunos productos intermedios de la hidrólisis y acidogénesis; compuestos como el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono son transformados a metano y dióxido de carbono [34]. A partir del ácido acético y el dióxido de carbono se dan dos vías para la generación de metano; alrededor del 70% procede del acetato, el cual sufre un proceso de descarboxilación ocasionado por las arqueas metanogénicas acetoclásticas y el 30% proviene de la reducción del dióxido de carbono por el hidrógeno a metano, el cual es usado como catalizador por las arqueas metaogénicas reductoras, esta fase es conocida como metanogénesis hidrogenotrófica [13]. Esta fase puede ser considerada como limitante en el proceso de digestión anaerobia para la mayoría de los sustratos, ya que la acción de las bacterias metanogénicas es generalmente lenta [41].

3.2.2 Principales variables que influyen en el proceso de digestión anaerobia

Temperatura: La temperatura es una de las variables que más influye en los procesos de digestión anaerobia pues incide en la tasa de crecimiento y supervivencia de los microorganismos [13]. En teoría la degradación anaerobia puede tener lugar entre los 0 y 100 °C [42], sin embargo, hay rangos óptimos para que se favorezca la actividad microbiana con gamas de temperatura entre los 10 y 60 °C [43]. Los rangos de temperatura se separan en tres clases: psicrófila (óptimo de temperatura entre 15-20 °C); mesófila (óptimo de temperatura entre 30-40 °C) y termófila (óptimo de temperatura entre 50 y 60 °C) [41]; el tratamiento de residuos bajo procesos anaerobios se lleva a cabo generalmente en el rango mesófilo y termófilo, considerándose temperaturas óptimas para cada uno de los rangos 35 y 55 °C respectivamente [44], normalmente no se suele operar en el rango psicrófilo ya que la actividad microbiológica es muy baja y por lo tanto también lo son las tasas de degradación y la producción de metano [41]. Kwietniewska *et al.* [40], concluyen que el efecto de la temperatura en las primeras etapas del proceso de digestión anaerobia (hidrólisis y acidogénesis) no es muy significativo, ya que la población microbiana se adapta fácilmente a los rangos de temperatura, mientras que la tercera y cuarta etapa (acetogénesis y metanogénesis) sólo pueden ser realizadas por ciertos microorganismos especializados que son muy sensibles a los cambios de temperatura. Es importante señalar que, dado que las estructuras microbianas activas en temperaturas mesófilas y termófilas

presentan grandes diferencias, un cambio de mesofílico a termofílico (o viceversa), puede resultar en una fuerte disminución en la producción de biogás [45]; incluso pequeños cambios en la temperatura pueden verse reflejados en anomalías e inestabilidad del proceso, afectando más los procesos termofílicos [46].

pH: El pH se considera como un parámetro de alta importancia durante la digestión anaerobia ya que no solo afecta la actividad microbiana, sino que también puede determinar las vías metabólicas y la solubilidad del sustrato, siendo un indicador del funcionamiento del proceso [47]. Las bacterias anaerobias necesitan diferentes intervalos de pH para su crecimiento, por lo tanto, cada grupo microbiano tiene sus propios valores de pH óptimos, mostrando en cada fase su actividad máxima en un rango de pH diferenciado, el cual varía de acuerdo con la etapa en que se encuentra la digestión. En la etapa inicial el pH está por debajo de 6, en las etapas posteriores el pH aumenta a medida que se produce metano [48]. Las bacterias anaerobias necesitan diferentes intervalos de pH para su crecimiento, por ejemplo, un intervalo entre 4.0 y 8.5 es requerido por las bacterias fermentativas, mientras que un rango de 6.5 a 7.2 es favorable para el crecimiento de los metanógenos, los cuales son muy sensibles a los cambios de pH [46]. Se ha reportado que el pH óptimo para el desarrollo de la hidrólisis y acidogénesis es de 5,5 y 6,5, razón por la cual algunos diseñadores prefieren usar reactores de dos etapas con el fin de separar los procesos de hidrólisis-acidogénesis y acetogénesis-metanogénesis [49]. Cuando la actividad de los microorganismos es afectada por variaciones en el pH se presentan efectos en otros parámetros operacionales, lo que se refleja en el tipo de microorganismos dominantes y la cantidad y calidad de los productos generados [23].

Tóxicos e Inhibidores: La digestión anaerobia puede ser inhibida por la presencia de sustancias tóxicas, las cuales pueden provenir de la materia prima con que es alimentado el sistema como amoníaco, metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles o, ser subproducto de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios como sulfuro, amoníaco y ácidos grasos; los microorganismos metanogénicos suelen ser los más sensibles a estos compuestos, aunque todos los grupos pueden ser afectados [50]. Debido a que en la digestión anaerobia hay etapas realizadas por microorganismos estrictamente anaerobios, el oxígeno se considera como un tóxico más del proceso [36]; igualmente, un nutriente esencial también puede ser tóxico si la concentración es muy alta [50].

Ácidos grasos volátiles – AGV: Los AGV son componentes intermedios de la digestión anaerobia que se producen durante la acidogénesis (ácido acético, propiónico, butírico, etc.) y tienen una alta importancia porque pueden llegar a acidificar el sistema provocando fallas en el proceso [51]. Bajo condiciones normales de operación, los AGV se deben presentar en bajas concentraciones o inapreciable; si existe una alta concentración podría provocar una caída en los valores de pH y la inhibición de las bacterias formadoras de metano [52]. Es importante así mismo contemplar la relación de AGV/alcalinidad, la cual indica la estabilidad del proceso; una relación con valores superiores a 0.4 es indicadora de fallos [53].

Tiempo de retención – TR: El TR se refiere al tiempo promedio de permanencia de la alimentación líquida o sólida en el digester anaerobio que puede ser de funcionamiento continuo, semicontinuo o discontinuo [13]. Existen dos tipos de tiempo de retención; dependiendo de la naturaleza del sustrato y del tipo de digester se encuentra el tiempo de retención hidráulico (TRH) que corresponde al tiempo que permanece la fracción líquida del influente en el interior del digester, y el tiempo de retención de sólidos (TRS) que indica el tiempo de permanencia promedio de la biomasa microbiana en el interior del digester [52]. La eficiencia del digester es estimada por la cantidad de materia orgánica degradada por unidad de volumen de éste; al aumentar el TRH la fracción de materia orgánica degradada aumenta, sin embargo, cuando se supera el TRH óptimo la producción volumétrica de metano puede disminuir [54]. Se considera que el TR es uno de los factores de mayor importancia en el diseño de procesos de digestión anaerobia. Para asegurar una conversión adecuada de la materia orgánica a biogás debe haber una cantidad y concentración suficiente de bacterias en el digester y deben tener un TR adecuado que permita la degradación del sustrato y evite el lavado de las bacterias [41]. Por lo tanto, el diseño del digester debe contar con suficiente volumen para que bajo unas condiciones de operación determinadas los microorganismos puedan tener el tiempo suficiente para desarrollarse, considerando así mismo, un elevado tiempo de retención de las bacterias puede disminuir considerablemente los efectos inhibitorios [48].

Nutrientes: Los microorganismos requieren de condiciones fisicoquímicas apropiadas para poder desarrollar sus funciones, considerando un adecuado balance de macro y micronutrientes [23]. Los niveles de nutrientes deben estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que se pueden inhibir severamente por falta de estos; sin embargo, una de las ventajas que presentan los sistemas de digestión anaerobia frente a los procesos aeróbicos, es la baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaerobios [36]. En los procesos de digestión anaerobia hay especial atención en la relación carbono-nitrógeno (C:N), ya que los desbalances en esta pueden tener influencia directa sobre la producción de biogás [50]. El carbono es la fuente de energía de las bacterias metanogénicas mientras que el nitrógeno contribuye a la formación de células nuevas durante el proceso [55]. Las bacterias consumen 30 veces más carbono, por lo que se reporta en la literatura que la relación C:N óptima para los procesos de digestión anaerobia debe estar en el rango entre 30:1 hasta 30:1 [36]. A bajas relaciones C:N se puede incrementar la producción de amoníaco lo que puede inhibir la producción de metano; por el contrario, una alta relación C:N puede traer consecuencias negativas sobre la producción de proteínas generando problemas en el metabolismo microbiano [56]. La presencia de fosfatos también es necesaria, ya que su carencia puede inhibir el proceso de generación de bacterias [55].

Carga orgánica: La carga orgánica se define como la cantidad en masa de sustrato orgánico alimentado por volumen de reactor y por día, expresado en unidades de demanda química de oxígeno – DQO o de sólidos volátiles – SV [56]. Este parámetro es directamente dependiente de la concentración del sustrato y del tiempo de retención, siendo determinante para el diseño de sistemas de digestión anaerobia ya que influye sobre la estabilidad del proceso y la producción de biogás [43]. Al aumentar la carga orgánica se incrementa el

rendimiento de producción de biogás, sin embargo, una carga orgánica excesiva puede dar lugar a la capacidad de degradación de los microorganismos, causando desequilibrios en el sistema como acumulación de AGV, disminución del pH y pérdida de capacidad tampón hasta llegar a un límite que puede causar inhibición [9].

3.2.3 Digestor anaerobio

Un biodigestor anaerobio es un tanque construido de diferentes materiales, variando su forma y tamaño y en estos se almacenan los residuos orgánicos como los procedentes de los residuos urbanos, material vegetal, estiércol de animales y humanos etc., y donde se prestan todas las condiciones para que se desarrolle el proceso de digestión anaerobia [52]. Se concibe como una planta productora de biogás, por lo tanto, el tanque debe disponer de un sistema que permita su captura evitando su mezcla con aire atmosférico. Se genera además digestato y un efluente con alto contenido de nutrientes [50].

Tipos de digestores anaerobios

Se han desarrollado diversos tipos de biodigestores anaerobios de acuerdo con las características del sustrato, la variación en su disponibilidad, cantidad, relación costo-beneficio y las características requeridas en los coproductos obtenidos [57]. En la literatura existen diferentes tipos de biodigestores y su uso se implementación ha sido tema de investigación para diversos tipos de sustrato, donde se busca una mayor eficiencia en términos de carga orgánica, retención hidráulica y producción de metano [52]. En la tabla 1 se presenta la clasificación de los tipos de biodigestores anaerobios según los criterios de operación. Por otro lado, en la tabla 2 se muestra hace una comparación entre las diferentes configuraciones de digestores.

Tabla 1. Clasificación de los tipos de digestores anaerobios

Criterio de clasificación	Clasificación
Temperatura de operación	Mesofílica
	Termofílica
Contenido de sólidos en el reactor	Digestión seca
	Digestión húmeda
Configuración de la planta	Una etapa
	Dos o más etapas
Forma en que se carga la materia orgánica	Batch
	Semicontínuos y continuos

Tomado y adaptado de [52].

- *Digestión húmeda y digestión seca:* Se considera digestión húmeda aquella con menos del 15% de sólidos secos en el digestor, mientras que la digestión seca es considerada para un alto porcentaje de sólidos secos (70%) [58]. Sistemas de digestión anaerobia aplicados a la fracción orgánica de residuos han incluido sistemas húmedos, secos e integrados que pueden funcionar bajo sistemas de una o varias etapas. La digestión húmeda en condiciones mesófilas se ha aplicado ampliamente para la digestión de residuos a base de alimentos, obteniendo

resultados satisfactorios; Demeyer *et al.* [59] y Takata *et al.* [60], informan que los sistemas húmedos tienen mayor demanda de energía, sobre todo para equipos adicionales que deben estar incluidos bajo este tipo de digestión, tanto para el tratamiento previo como para la post-digestión. En los sistemas de digestión seca se puede presentar acidificación puntual o localizada por las limitaciones en la transferencia de masa, lo que puede inhibir la actividad metanogénica; los microorganismos requieren un ambiente acuoso que facilita el proceso de digestión anaerobia. En los sistemas con alto contenido de sólidos puede no existir suficiente agua disponible; en estos sistemas los TRH son mayores en comparación con las tecnologías húmedas [23, 61]. Takata *et al.* [60] mediante la evaluación de digestores anaerobios húmedos y secos en el aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos urbanos, recomiendan el uso de sistemas integrados, incorporando un pretratamiento para la estabilidad del proceso y aumento en la producción de biogás.

- *Digestión de una o más etapas:* En los sistemas de una etapa todas las fases de la digestión anaerobia ocurren en un solo reactor. En los sistemas de dos o más etapas, la digestión ocurre en dos o más dispositivos, desarrollando primeramente las reacciones de hidrólisis y acidogénesis y posteriormente la fase acetogénica y metanogénica. El efluente de la primera etapa sufre un nuevo proceso de digestión en las etapas posteriores [50]. La separación de fases permite mejorar el rendimiento del proceso, debido a la adaptación de cada ecosistema de microorganismos a su propio sustrato [62]. Los sistemas de una etapa han sido considerados mayoritariamente a escala industrial debido a su simplicidad de operación, costos y menor problema técnico [63]. Sistemas multietapa han sido aplicados con éxito para tratar residuos sólidos cuya limitante es la hidrólisis como frutas, verduras, residuos sólidos urbanos, de ganado vacuno, etc. [64], caracterizándose por largos periodos de retención, buena descomposición de la materia orgánica y una alta inversión [50]. Estos sistemas son usados generalmente para optimizar el proceso de digestión, resultando en el aumento potencial de producción de biogás [65]. Shahriari *et al.* [66] reportaron para digestores de una etapa que la velocidad de la carga orgánica se limita a la capacidad que tienen los microorganismos metanogénicos para tolerar la reducción del pH, teniendo en este tipo de digestores problemas en la digestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, esto debido principalmente a la acumulación de ácidos grasos volátiles en el reactor. Rapport *et al.* [67] reportaron que estos problemas se pueden superar en un sistema de dos etapas, proporcionando un mejor control de procesos para las diferentes etapas de las reacciones bioquímicas y la mejora de la digestión, siendo estos sistemas biológicamente más estables, sobre todo por la aceptación de la fluctuación de los tipos de materias primas y velocidades de carga orgánica. Así mismo, Rapport *et al.* [67] y Franchetti [6], para residuos de la fracción orgánica urbana mediante digestores de dos etapas, muestran una digestión eficaz, una alta estabilización de los residuos y una alta producción de metano en comparación con reactores de una etapa.

- *Reactores batch, semicontinuos y continuos:* Este tipo de digestores está determinado por la forma en que se carga la materia orgánica. En los sistemas batch el digestor se carga una sola vez o por lotes (discontinuos) con una cantidad determinada de materia orgánica, después de cierto periodo de fermentación, cuando disminuye el rendimiento de biogás a un bajo nivel, se vacía el digestor por completo y se alimenta de nuevo [36]. Este sistema es aplicable cuando la materia orgánica a procesar está disponible de forma intermitente, o cuando hay materiales celulósicos que no pueden ser tratados en digestores continuos debido al taponamiento de los conductos [57]. Estos digestores pueden ser muy susceptibles de uso para la digestión de residuos de alimento debido al alto contenido de sólidos secos y a las características fibrosas [52]; además, son ideales a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o mezcla entre diferentes tipos de residuo orgánico [30].

En los sistemas continuos y semicontinuos el volumen de material orgánico que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente, de este modo se mantiene en el reactor un volumen constante [68]. La alimentación en los sistemas semicontinuos se realiza por pequeños baches durante el proceso, que se extiende indefinidamente a través del tiempo [30]; son calculados en función del tiempo de retención hidráulico y del volumen total del digestor [36]. Estos sistemas producen una cantidad constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación [69]. Los digestores continuos tienen una alimentación ininterrumpida, siendo desarrollados principalmente para tratamiento de aguas residuales con plantas de gran capacidad [36]. A diferencia de los sistemas en batch, los sistemas semicontinuos y continuos presentan un mayor rendimiento de biogás, ya que evita en gran medida los problemas de obstrucción, teniendo un mejor manejo del percolado [52].

Tabla 2. Comparación de los diferentes tipos de biodigestores.

Criterio	Una etapa vs dos etapas		Seco vs húmedo		Batch vs continuo	
	Una etapa	Dos etapas	Seco	Húmedo	Batch	Continuo
Producción de biogás	Irregular y discontinuo	Alto y estable	Alto	Bajo e irregular	Irregular y discontinuo	Continuo
Contenido de sólidos	10 - 40%	2-40%	20-50%	2-12%	25-40%	2-15%
Costo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Reducción SV	Bajo a alto	Alto	40-70%	40-75%	40-70%	40-75%
TRH (Días)*	10-60	10-15	14-60	25-60	30-60	30-60

Criterio	Una etapa vs dos etapas		Seco vs húmedo		Batch vs continuo	
	Una etapa	Dos etapas	Seco	Húmedo	Batch	Continuo
TCO (Kg SV m-3 d-1)**	0.7-15	10-15 para 2a etapa	12 - 15	< 5	12-15	0.7-1.4

TCO: Tasa de carga orgánica

TRH: Tiempo de retención hidráulico

Tomado y adaptado de [52, 70].

3.3 Potencial Bioquímico Metanogénico - PBM

El potencial bioquímico metanogénico (PBM) es una prueba experimental que se utiliza con el fin de determinar la máxima producción de metano de un determinado sustrato bajo diferentes condiciones operacionales [38]. El principio general de la técnica consiste en la incubación de un sustrato como fuente de carbono con una variedad de microorganismos anaerobios (inóculo), en un medio adecuado (agua y minerales) y a un rango específico de temperatura [71]. Los sustratos son degradados anaerobiamente, obteniendo como productos finales metano y dióxido de carbono; la cantidad de biogás producido se determina más comúnmente usando métodos basados en principios manométricos o volumétricos [38]. El potencial de producción de metano obtenible se presenta como el volumen de metano que puede ser producido por gramo del material orgánico cargado, que se puede presentar en términos de sólidos volátiles, demanda química de oxígeno o demanda bioquímica de oxígeno [38, 30]. Es una prueba simple, económica, confiable y reproducible, que proporciona información sobre la cantidad y rapidez con que el material orgánico se puede degradar en condiciones determinadas, lo que permite que sea usada como herramienta para el diseño y optimización técnica-económica de las plantas de digestión anaerobia [23, 34]. Asociado al incremento de la aplicación de la tecnología de digestión anaerobia y a la relevancia de los resultados que arroja la prueba PBM, diversas investigaciones se han centrado en determinar el potencial de producción de metano de diferentes tipos de residuos orgánicos, buscando además estandarizar esta prueba con resultados poco favorables. Diferentes protocolos planteados se diferencian en función del propósito de la medición, el tipo de muestras, las unidades de las variables presentadas, haciendo que la comparación de los datos de biodegradabilidad en la literatura sea compleja [9]; por lo tanto, no se cuenta con un método como tal estandarizado por las numerosas variables que se involucran en esta prueba [23].

3.4 Digestión anaerobia en el aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos

La digestión anaerobia ha servido como una alternativa prometedora para el tratamiento de diferentes tipos de residuos orgánicos, donde en las últimas décadas se ha producido un incremento significativo en el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, siendo además de gran importancia en el tratamiento de residuos agrícolas,

ganaderos, subproductos orgánicos, cultivos energéticos, plantas leñosas, combinaciones entre estos, etc.; en los artículos publicados en los últimos años, los principales sustratos utilizados han sido el estiércol de animal, lodo de depuradora y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos [34]. La digestión anaerobia ha sido presentada como una tecnología adecuada para el tratamiento de los residuos orgánicos urbanos y la producción de energía a partir de la generación de biogás, alcanzando dos objetivos fundamentales simultáneamente, por un lado, el manejo adecuado de los residuos y la producción de energía renovable y por otro lado la reducción de GEI comparada con otras modalidades de manejo de los residuos sólidos urbanos [13]; la aplicación de esta tecnología ha demostrado ser uno de los procesos más prometedores para el tratamiento de los residuos orgánicos, siendo una vía estabilización y aprovechamiento favorable, porque produce complementariamente energía y fertilizantes de alta calidad [72, 73].

A nivel mundial la mayoría de plantas de digestión anaerobia se utilizan para lodos de depuradora y residuos de ganado [8], siendo la aplicación en los residuos orgánicos municipales competitiva, desafiante y en desarrollo [74]. Solo una pequeña fracción de residuos orgánicos urbanos es digerida anaeróbicamente en todo el mundo, siendo el compostaje el proceso más utilizado para el aprovechamiento de este tipo de residuos [74]. La digestión anaerobia viene siendo ampliamente implementada en países desarrollados y en algunas economías emergentes [34], lo que se debe principalmente a las herramientas normativas estipuladas para incrementar la producción de biogás a partir de materiales renovables [13]. De acuerdo con De Baere *et al.* [75], en Europa, la digestión anaerobia ha alcanzado mayor auge en el campo del tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos en comparación con otras tecnologías alternativas desarrolladas en los últimos 20 años, siendo muchos casos de éxito los que posicionan esta tecnología a largo plazo como prometedora para este tipo de residuos. La implementación de los procesos de separación en la fuente a partir de los años 90 provocó la instalación de un gran número de plantas de digestión anaerobia, a pesar de que apenas estaba en surgimiento, reemplazando en gran parte a los sistemas de compostaje [28]. Las estimaciones políticas de la Unión Europea plantean que al menos el 25% de toda la bioenergía puede derivarse del biogás [76]. Actualmente, Alemania es el país con mayor producción de biogás en el mundo, siendo las plantas agrícolas las de mayor desarrollo [8].

En países en vía de desarrollo, el avance en la implementación de la digestión anaerobia es limitado [34], lo que se atribuye a la carencia de políticas que incentiven el uso de esta tecnología, además, a la disponibilidad de materias primas seguras de alta calidad que depende directamente de los procesos de separación en la fuente [10]. La digestión anaerobia no sólo es factible en procesos industriales a gran escala, también puede ser aplicada en pequeña escala, característica que proporciona oportunidades para el desarrollo de esta tecnología en los países en desarrollo y las zonas rurales, donde el suministro de energía es limitado [38]. Aunque en países tecnológicamente y agrícolamente avanzados se ha demostrado la viabilidad de esta tecnología, el desarrollo sigue siendo necesario para su implementación en diferentes regiones del mundo, especialmente para el tratamiento de los residuos orgánicos urbanos [8].

Son muchos los estudios que se han llevado a cabo acerca de los procesos de digestión anaerobia de la fracción de orgánica de los residuos sólidos urbanos, donde se ha prestado el interés desde diferentes perspectivas para maximizar la eficiencia en este tipo de residuos, lo cual depende directamente de parámetros como la composición, temperatura, pH, TRH, concentración de sólidos, carga orgánica, entre otros. La eficiencia depende así mismo de la selección adecuada del diseño del digestor, sea una o dos etapas, en estado seco o húmedo, batch, semicontinuos o continuos [48]. Revisiones publicadas sintetizan los descubrimientos en los sistemas de digestión anaerobia para la FORSU. Zhang *et al.* [77] estudiaron los pretratamientos físicos, termoquímicos, biológicos y combinados, así como métodos de codigestión para mejorar la digestión anaerobia de la FORSU. Mao *et al.* [9] resumieron el impacto de diferentes configuraciones de sistemas de digestión anaerobia en el potencial de metano, cubriendo una alta gama de sustratos incluida la FORSU, residuos lignocelulósicos, estiércol de ganado y residuos de lodos activados. Van Fan *et al.* [8] estudiaron las características de la FORSU de 43 ciudades en 22 países donde se compilaron y compararon datos de producción de metano, que depende no solo de las características de la FORSU sino también de la configuración del sistema.

Otras investigaciones han concentrado los esfuerzos en estudiar la relación entre la producción de biogás y las características fisicoquímicas de la FORSU; otros analizan características químicas como los tipos de moléculas, composición elemental y propiedades bromatológicas [78, 79, 80]. Además, se han centrado investigaciones en conocer la variación de las características fisicoquímicas y bromatológicas de los residuos según la región geográfica, cantidad de población, desarrollo socioeconómico, clima, cultura y sistemas de recolección de los residuos urbanos [81, 82]. Las características que presentan los residuos de alimentos contenidos dentro de la FORSU junto con su excelente biodegradabilidad hacen que sean un sustrato apto para la digestión anaerobia [38]. Estudios realizados por Cabbai *et al.* [83], demuestran que la fracción orgánica proveniente de supermercados y residuos de alimentos son sustratos que presentan alta generación de metano.

Existen algunas consideraciones de importancia en el tratamiento de la FORSU mediante digestión anaerobia como la puesta en marcha de los reactores [84], el aumento del tiempo de estabilización y la presencia de compuestos tóxicos e inhibidores cuando la FORSU no son separados adecuadamente de los residuos inorgánicos [43]. Así mismo, es necesario un análisis completo del sistema a lo largo del tiempo, ya que este es sensible a las diferentes composiciones de los residuos que pueden afectar la cinética [82, 85]. La codigestión de sustratos, el tratamiento previo, la separación por etapas, entre otras, son estrategias que se han implementado en el tratamiento de este tipo de residuos principalmente para mejorar la producción de biogás, equilibrar los nutrientes y controlar la acidogénesis en el proceso [86]. En la tabla 3 se muestran algunos estudios desarrollados en diferentes partes del mundo para la FORSU, donde se ha demostrado el rendimiento en la digestión anaerobia de este tipo de residuos.

Tabla 3. Estudios reportados para sistemas de digestión anaerobia en el tratamiento de la FORSU

Sustrato	Rendimiento reportado	Referencia
Residuos sólidos municipales	186 – 222 L CH ₄ / kg SV	O’Keefe, Owens, & Chynoweth, 1996
Frutas y vegetales	180 - 732 L CH ₄ /kg SV	Gunaseelan, 2004
Frutas y vegetales – Mezclas	595 L CH ₄ /kg SV	Sitorus, et al. 2013
Residuos orgánicos domésticos separados en la fuente	495 L CH ₄ /kg SV	La Cour Jansen, et al. 2004
Residuos sólidos municipales (alimentos) diferentes fuentes	300 – 570 L CH ₄ /kg SV	(Davidsson, Lövestedt, la Cour Jansen, Gruvberger, & Aspegren, 2008)
Residuos sólidos municipales	360 L CH ₄ /kg SV	Shanmugam & Horan, 2009
Residuos alimento	340 L CH ₄ /kg SV	(James D. Browne, Allen, & Murphy, 2013
Residuo de verdura	350 L CH ₄ /kg SV	Álvarez, Caneta, & Moyano, 2009
Residuo de frutas y vegetales	187 – 405 L CH ₄ /kg SV	Lehtomäki et al, 2008
Biorresiduos + lodos de AR	50 – 510 L biogás/kg SV	Diat et al. 1981
Biorresiduos	380-460 L biogás/kg SV	Hofenk et al. 1984
Biorresiduos	570-690 L biogás/kg SV	Vermeulen et al. 1993
Biorresiduos	200-460 L biogás/kg SV	Mtz et al. 1995
Residuos de cocina	800-830 L biogás/kg SV	Schober et al. (1999)
Residuos sólidos municipales + inóculo	564 L biogás/kg SV	Rao et al., 2000
Residuos de comida	707 L biogás/kg SV	Boutgalli et al. 2003
Residuos de comida	705 – 997 L biogás/kg SV	Bouallagui et al. 2004
Biorresiduos municipales + Lodos de un digestor de biorresiduo	800 L biogás/kg SV	(Fernández et al. 2005
Biorresiduos municipales +Lodos ARD	710 L biogás/kg SV	Angelidaki et al. 2006
Biorresiduos municipales +Lodos ARD	710 L biogás/kg SV	Davidsson et al. 2007
Biorresiduos plazas de mercado+ Lodo de un digestor de biorresiduos+ Excreta porcina	750-1100 L biogás/kg SV	Fantozzi & Cinzia, 2011

Sustrato	Rendimiento reportado	Referencia
Residuos de frutas y verduras	560 L biogás/kg SV	Mosos et al., 2012
Residuos de comida+ Lodos ARD	221-283 L CH ₄ /kg SV	Elbeshbishy et al., 2012
Biorresiduos municipales + Lodo ARD	99-571 L CH ₄ /kg SV	Cabbai et al., 2013
Residuos provenientes de restaurantes	230 – 314 364 L CH ₄ /kg SV	Che ey al., 2013
Residuo de frutas y verduras	595 L CH ₄ /kg SV	Sitorus et al., 2013
Residuos de origen municipal	410 L biogás/ Kg DQO	Cadavid. 2012
FORSU	160 L CH ₄ / Kg DQO	Moreno et al., 2017
Residuos de poda y alimentos	216 L CH ₄ /Kg SV	Pacheco, 2016
Lodo de aguas residuales y residuos de alimento	260 L CH ₄ /Kg SV	Julio, 2016
Biorresiduos de origen municipal	102 L CH ₄ /Kg SV	Parra, 2014

Tomado y adaptado de: [13, 52, 87]

En Colombia, el tratamiento de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia se ha desarrollado por más de 30 años con el objetivo de apostarle al aprovechamiento de los residuos ganaderos, industriales, agrícolas y municipales para la producción de energía renovable, principalmente para atender las necesidades básicas del sector rural como cocción de alimentos e iluminación [88]. Esta tecnología se ha ido consolidando debido a la implementación de mejores materiales en el desarrollo de biodigestores y la optimización del proceso, llamando la atención en el país debido a la capacidad de procesar diversos tipos de residuos orgánicos utilizando biodigestores para producir metano [89]. La mayoría de los procesos de digestión anaerobia en Colombia han estado ligados al tratamiento de las aguas residuales [45], encontrándose un importante número de publicaciones e investigaciones enfocadas a la optimización de esta tecnología desde los procesos hidráulicos, fisicoquímicos y biológicos para el tratamiento de estas [30]. En general, en los sectores donde se cuenta con procesos de digestión anaerobia en Colombia no se realiza un aprovechamiento del biogás, por lo que este generalmente es emitido a la atmósfera o quemado [24].

En el país son pocas las investigaciones que se han desarrollado para la digestión anaerobia de la FORSU frente a la producción científica de los países desarrollados; la mayoría de las investigaciones de las que se tiene registro sobre FORSU en Colombia son desarrolladas a escala de laboratorio [13], lo que ha limitado el entendimiento operacional de esta tecnología a mayor escala y la incursión en la producción de biogás de manera industrial aunque se presente gran potencial de acuerdo a los tipos de biomasa que se generan.

Investigaciones desarrolladas en Colombia donde se contempla el tratamiento de la FORSU mediante sistemas de digestión anaerobia reportan un alto potencial para el

aprovechamiento de este tipo de residuos; Mosos *et al.* [90] determinaron el potencial que presentan los residuos de alimentos producidos en restaurantes de la ciudad de Palmira para generar energía renovable en forma de biogás, encontrando una producción de 364 L CH₄/kg SV con un contenido de metano del 65% en este. Cadavid [91] bajo evaluación de un sistema de dos etapas obtiene eficiencia en términos de eliminación de materia orgánica y rendimiento del biogás y metano, con porcentajes de eliminación media de DQO del 90%, alcanzando un máximo rendimiento de 410 L biogás/kg DQO. Moreno *et al.* [92] determinaron en un sistema multietapa de digestión anaerobia para FORSU porcentajes de remoción de DQO mayores al 90% y un rendimiento de metano de 159.58 L CH₄/kg DQO. Pacheco González [52] reporta que la codigestión a escala piloto de residuos de poda con residuos de alimentos incrementan el rendimiento en la generación y la producción volumétrica de metano comparado con sistemas de monodigestión de residuos de poda, obteniendo rendimientos en la producción de biogás de 216 L CH₄/kg SV. Por su parte, Julio Guerrero [38] evaluó diferentes relaciones de mezcla a escala de laboratorio entre lodo primario y residuos de alimento, encontrando un mayor rendimiento en términos de metano cuando la relación de mezcla contenía mayor porcentaje de residuos de alimento con rendimientos de 260 L CH₄/kg SV. Finalmente, Parra Orobio [13] determinó el potencial metanogénico de residuos orgánicos de origen municipal evaluando diferentes relaciones entre el sustrato y el inóculo, pH y tamaño de partícula, registrando valores de rendimiento superiores a 102 L CH₄/kg SV.

El Grupo de Investigación en Estudios Moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia viene trabajando desde los últimos años en procesos de digestión anaerobia para diferentes tipos de residuos orgánicos; se han desarrollado diversos procesos a escala de laboratorio con el fin de conocer el potencial de aprovechamiento en términos energéticos y materiales de la FORSU; así mismo, se ha llevado a cabo la implementación de sistemas de digestión anaerobia en procesos seco-húmedo y por etapas a escala piloto para el tratamiento de FORSU provenientes de diferentes municipios, donde se han instalado sistemas de digestión anaerobia en el relleno sanitario del municipio de El Carmen de Viboral, relleno sanitario del municipio de Támesis y relleno sanitario del municipio de El Peñol, obteniendo importantes avances en la optimización de los procesos y la eficiencia del aprovechamiento energético y material en nuestro medio.

Se han desarrollado en el país esfuerzos para posicionar la digestión anaerobia dentro de los procesos de tratamiento de la FORSU; son muchas las instituciones y entidades que hacen parte de la Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe (RedBioLac) que tiene como principales objetivos intercambiar información y experiencias entre diferentes instituciones para identificar y superar barreras que enfrenta esta tecnología en nuestro medio; así mismo, se destaca la creación de la Red Colombiana de Energía de la Biomasa (RedBioCol), que busca promocionar el aprovechamiento energético de residuos orgánicos en los territorios [34].

3.5 Coproductos del proceso de digestión anaerobia

Los procesos de digestión anaerobia generan diferentes coproductos, que corresponden al biogás que puede ser valorizado energéticamente y una fracción líquida (efluente) y una

sólida (digestato) que mediante procesos de estabilización lograr tener una alta capacidad para ser usados como acondicionador y/o biofertilizante.

Biogás

El biogás generado mediante los procesos de digestión anaerobia está compuesto principalmente por CH_4 y CO_2 , pero contiene también partículas y trazas de otros gases como H_2 , N_2 y H_2S [93]. Dependiendo del uso que se le dé al biogás, se establecen los requisitos de purificación o acondicionamiento necesarios; la purificación es importante debido a que puede aumentar el poder calorífico del biogás y permite cumplir con los requerimientos de algunos equipos para el aprovechamiento [34].

Las características que presenta el biogás lo han posicionado como una fuente prometedora de energía renovable, en la figura 2 se presentan algunas equivalencias energéticas del biogás respecto a otras fuentes de energía.



Figura 2. Equivalencias energéticas del biogás

Tomado de: [94]

Existen varias opciones para el aprovechamiento del biogás, donde se destacan:

- *Producción de calor o vapor:* Este es el uso más simple que corresponde a la obtención de energía térmica; es utilizado principalmente para proporcionar energía calórica para calentadores, cocinas de gas, lámparas o quemadores-estufas tanto a nivel industrial como doméstico [36, 14].
- *Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad:* Se utiliza la electricidad generada partir del biogás mediante motores de combustión o turbinas de gas; para el desarrollo de este tipo de procesos es necesario contar con un sistema de purificación del biogás. Por su parte los sistemas de cogeneración se

fundamentan en el aprovechamiento de calor y electricidad generados en el proceso; estos sistemas suponen mayor eficiencia puesto que en los sistemas tradicionales el calor producido no se recupera [14].

- *Integración en la red de gas natural:* El alto contenido de metano que puede presentar el biogás hace que sea una fuente idónea para su uso en la red de distribución de gas natural, siendo necesario una purificación previa garantizando la eliminación de CO₂, H₂S, NH₃, agua y partículas sólidas [14].

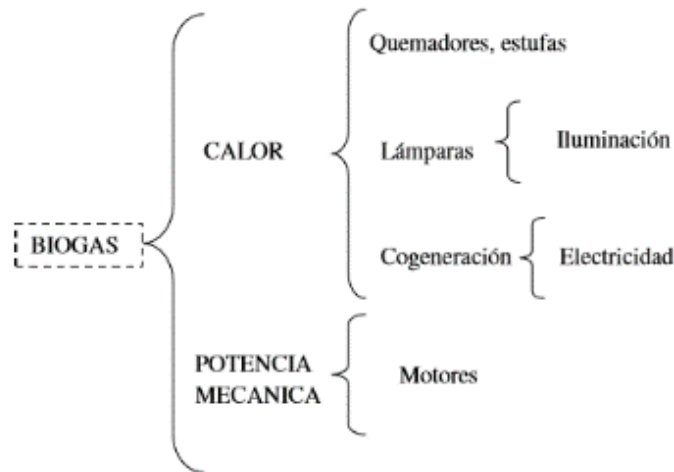


Figura 3. Usos del biogás

Tomado de: (Hilbert, 1998) citado por: [55]

Efluente y digestato

Además de la producción de biogás, en los procesos de digestión anaerobia se generan otros coproductos con potencial de aprovechamiento material que pueden aportar nutrientes y materia orgánica tanto al suelo como a las plantas. Estos coproductos corresponden a un efluente (fracción líquida) y digestato (fracción sólida); para su posterior uso hay que tener en cuenta la legislación vigente en materia de aprovechamiento y/o uso de enmiendas, abonos o fertilizantes, por lo que en muchos casos se debe aplicar una serie de tratamientos o formulación para su utilización o comercialización [64].

El efluente es generado debido a la entrada continua de percolado al sistema que desplaza un volumen equivalente de material de descarga. Este está compuesto por el influente estabilizado y biomasa microbiana producida por el proceso de digestión [95] y contiene gran parte de los nutrientes aportados por la materia prima utilizada como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que le confiere un valor como fertilizante orgánico [96]. Dependiendo de su composición química puede utilizarse como fuente de nutrientes en cultivos, abono foliar o estimulante para el desarrollo de las plantas [64].

Por su parte, el digestato que corresponde a la fracción sólida usualmente es compostado y complementado con fertilizantes químicos, obteniendo un producto final con altos contenidos de materia orgánica (<20%), siendo además rico en micro y macronutrientes [31]. El digestato estabilizado dependiendo de sus propiedades puede ser usado para mantener o mejorar las características fisicoquímicas de los suelos, así como para mejorar el almacenamiento de nutrientes, capacidad de retención de humedad y estímulo de la actividad microbiana [97]. No es recomendable incorporar el digestato al suelo sin previa estabilización, ya que requiere largos periodos de tiempo para transformarse en compuestos asimilables por las plantas; por lo tanto, la estabilización tiene como finalidad acelerar la descomposición o mineralización primaria de subproductos y residuos orgánicos para obtener un producto más estable biológicamente, enriquecido en compuestos húmicos y libre de patógenos [64].

Tanto la calidad del efluente como del digestato estabilizado dependen del tipo de sustrato utilizado, los pretratamientos y las características de la digestión y como se mencionó anteriormente deben ser evaluados de acuerdo con diferentes parámetros fisicoquímicos para determinar la conveniencia de su aplicación. Propiedades como el pH, salinidad, contenido de nutrientes y metales pesados deben ser tenidas en cuenta antes de la aplicación del material, así mismo, debe ser evaluada la carga de patógenos y se recomienda contrastar el balance de nutrientes a aportar y los requeridos por el suelo [34].

4. Metodología

En esta sección se describe la metodología empleada en el desarrollo de este estudio. El contenido de esta se divide en cuatro apartados, en el primero se detalla el proceso de identificación de los generadores de residuos sólidos orgánicos en el barrio Moravia y el proceso de caracterización y aforo de los residuos orgánicos generados; en el segundo apartado se presenta el montaje de las pruebas de potencial bioquímico metanogénico a escala de laboratorio para la fracción orgánica de residuos generados en el barrio Moravia; en el tercer apartado se detalla el proceso de implementación y puesta en marcha de un sistema de digestión anaerobia en el Morro de Moravia para el aprovechamiento energético y material de la fracción orgánica de residuos sólidos que se generan en algunos sectores del barrio y finalmente se menciona la caracterización fisicoquímica y/o microbiológica realizada a los coproductos obtenidos para su aprovechamiento.

En la figura 5, se detalla el proceso seguido.

Localización del barrio Moravia

El barrio Moravia se encuentra ubicado en la zona nororiental de la ciudad de Medellín, dentro de la comuna 4 Aranjuez, cuenta con una extensión de 43,7 hectáreas y una población de 44,000 habitantes. Limita al norte con la calle 93 y la Quebrada La Herradura, al oriente con la calle 78 y la carrera 55, Carabobo y la antigua vía a Machado; al sur con la calle 77 y al occidente con el río Medellín. Está conformado por cinco sectores: El Bosque, Moravia, El Morro, El Oasis Tropical y La Herradura [98]. El sector El Morro corresponde al antiguo botadero a cielo abierto de la ciudad que cuenta con un área de 7,6 hectáreas y donde en la actualidad se lleva a cabo un proceso de habilitación ambiental por parte de la Secretaría de Medio Ambiente de la Alcaldía de Medellín y la Universidad de Antioquia a través del GIEM.



Figura 4. Sectores del barrio Moravia

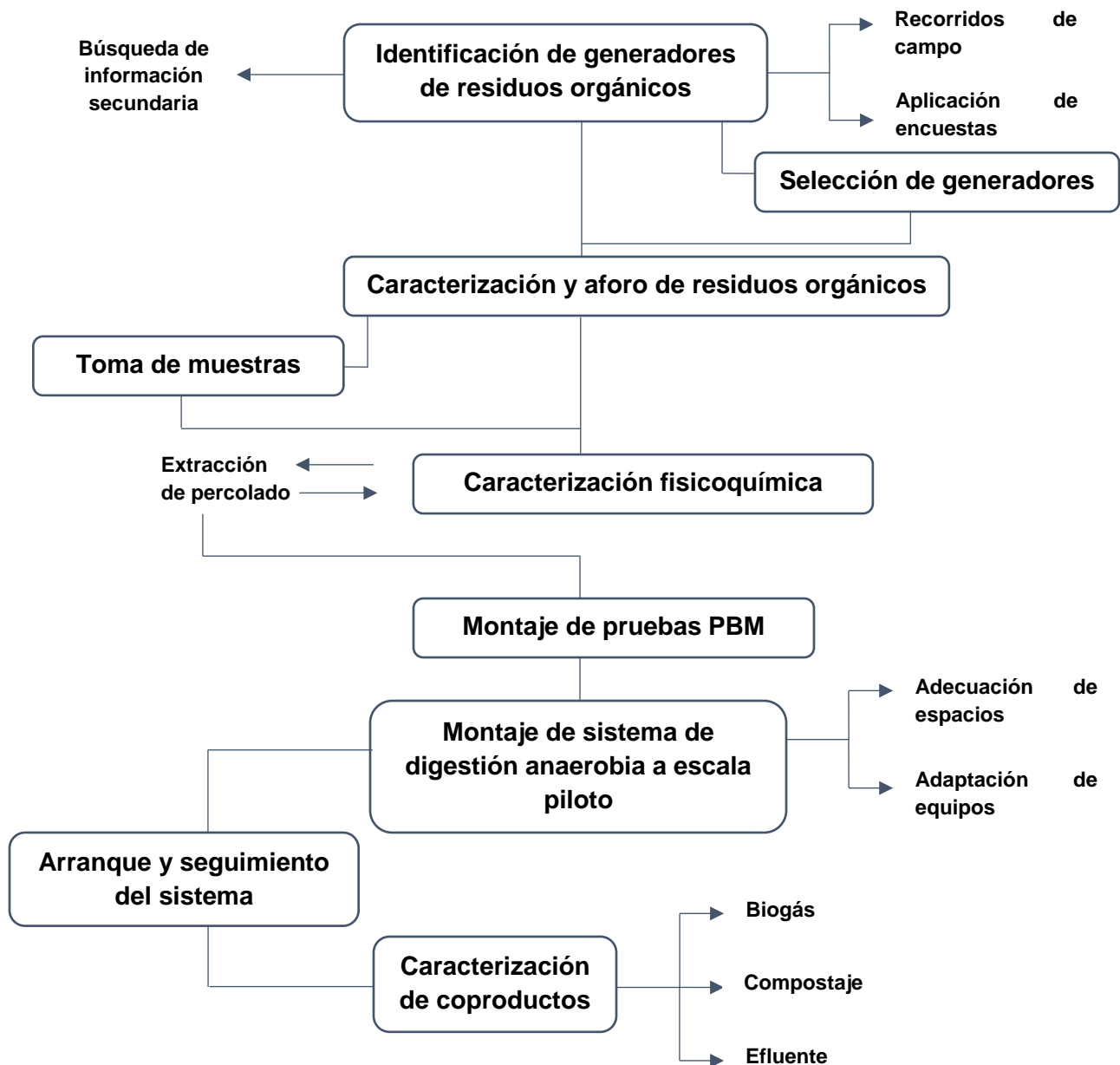


Figura 5. Metodología implementada

4.1 Identificación de los generadores de residuos sólidos orgánicos en el barrio Moravia

De acuerdo con la dinámica del barrio Moravia, se logró identificar diferentes sectores que pueden ser potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos tales como el comercial, industrial, institucional, residencial y como caso especial el Morro de Moravia (tabla 4); sin embargo, para efectos de este estudio se descartó el sector residencial debido a problemas asociados con la separación en la fuente y, considerando su magnitud, se convirtió en un tema de difícil control en este estudio; los residuos orgánicos producto de la poda que se genera en las actividades de habilitación ambiental del Morro de Moravia no se incluyeron

en este estudio, ya que pueden presentar trazas de metales pesados de acuerdo a informes presentados por la Alcaldía de Medellín [98]; se busca que sean considerados en el proceso de aprovechamiento material posterior a una estabilización. Por su parte, los puntos generadores pertenecientes al sector comercial, industrial e institucional pueden presentar carencia en cuanto al manejo de la fracción orgánica de los residuos, que desencadena en problemáticas en el barrio por la falta de gestión adecuada de estos. Así pues, en este estudio se contempló la generación de los residuos sólidos orgánicos que se generan en estos últimos tres sectores. Esta identificación se hizo considerando los pasos planteados en la guía de planeación estratégica para el manejo de residuos sólidos en Colombia [99].

Tabla 4. Sectores que confluyen en el barrio Moravia

Sector	Descripción
Comercial	Corresponde a los restaurantes, tiendas y mercados; presentan por lo general alta producción de residuos en estado fresco.
Institucional	Se incluyen las instituciones públicas y privadas como colegios, jardines infantiles centros de atención ciudadana, etc. Se caracteriza por contener residuos provenientes de comedores y restaurantes institucionales.
Industrial	Hacen parte las pequeñas y medianas empresas que tienen como actividad la producción y/o transformación de materias primas orgánicas; se pueden generar tanto residuos en estado fresco como preparados.
Residencial	Corresponde a los hogares. Los residuos tienen una composición variada, pero mayormente contienen restos de alimentos en estado fresco y preparados.
Morro de Moravia	Es el antiguo botadero de residuos de Medellín. Representa una fuente significativa de residuos de poda que son generados a partir de las actividades de habilitación ambiental que allí se llevan a cabo.

Adaptado de: [29]

La identificación de generadores de residuos sólidos orgánicos pertenecientes a los tres sectores mencionados se ha llevado a cabo en los sectores del barrio: El Bosque y Moravia, donde se concentra la mayor actividad comercial, institucional e industrial. Los sectores El Oasis y La Herradura no se incluyeron en este estudio por dificultades de acceso, lejanía al Morro de Moravia y la baja presencia de puntos que pueden ser considerados como potenciales generadores de residuos orgánicos. En la figura 5, se detalla la zona donde se llevó a cabo la identificación de los generadores (color naranja) y el área que corresponde al Morro de Moravia (color verde).

4.1.1 Aplicación de encuesta a los potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos

Una vez identificados los potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos de los sectores priorizados en el barrio Moravia, se realizó una visita a estos puntos y se aplicó una encuesta al encargado. La encuesta constó de un encabezado de identificación y 10 preguntas y estuvo dividida en 4 componentes, el primero de datos generales, con la cual se busca obtener información acerca del propietario, la dirección y datos de contacto, así como el tipo de actividad y sector al cual se encuentra vinculado. En el segundo se busca obtener información acerca del tipo y cantidad de residuos orgánicos generados. En el tercero se busca identificar el manejo de los residuos orgánicos en el punto. Con el cuarto se pretende conocer la disponibilidad y actitud de las personas encargadas de los puntos de generación para participar en el desarrollo de un proceso que involucre los residuos orgánicos generados producto de la actividad desarrollada.

Posterior a la aplicación de la encuesta y considerando los resultados, se seleccionaron los puntos generadores con potencial para el desarrollo del proceso de acuerdo con el tipo y estado del residuo generado, cantidad y frecuencia de generación, separación en la fuente de la fracción orgánica, capacidad para manejar los residuos y disponibilidad y compromiso para participar del proceso.

4.2 Caracterización y aforo de los residuos sólidos orgánicos

En cada uno de los puntos seleccionados, se realizó el aforo y caracterización de los residuos orgánicos con el fin de determinar la cantidad y el tipo de estos, considerando la metodología planteada en el Reglamento de Agua y Saneamiento Básico (RAS) – título F [101]. Se tuvo en cuenta además, la actividad específica de cada sector, sea transformación, producción, fabricación o mercadeo.

Previamente a esta actividad, se realizaron visitas a cada uno de los puntos, donde se ha explicado el proceso a desarrollar y se ha pedido tanto al encargado como a los operarios, la separación y almacenamiento de los residuos orgánicos en un recipiente diferente a los demás residuos en el tiempo de duración de esta fase.

Esta actividad se llevó a cabo por un periodo de 10 días, realizando mediciones diariamente en el sitio definido en cada punto generador. Se diseñó una ficha de registro para la determinación del tipo de residuo y la cantidad generada.

Para la caracterización, se definieron diferentes categorías de tipo de residuo orgánico, que son mostradas en la tabla 5. Para el desarrollo de esta actividad, en cada punto se realizó la identificación del tipo de residuo y se clasificó de acuerdo con las categorías definidas.

Tabla 5. Tipos de residuos sólidos orgánicos definidos para caracterización y aforo

Tipo de residuos	Descripción
Restos de comida sin procesar	Restos de alimentos que no han pasado por un proceso de cocción.
Restos de comida procesada	Son los alimentos que pasaron por un proceso de cocción, son generados principalmente en los restaurantes y alguna parte del sector industrial.
Residuos de frutas, verduras y vegetales frescos	Residuos que se encuentran en estado fresco, sin pudrición o degradación.
Residuos de poda	Procedentes de la poda de material vegetal, como hojas, ramas, etc.
Otros orgánicos	Algún otro residuo orgánico generado que no se pueda clasificar dentro de los tipos anteriores.

Tomado y adaptado de [18]

Posterior a la clasificación del residuo orgánico generado, se realizó el aforo de estos, que consiste en el pesaje de cada tipo de residuo (Ec. 1). Este procedimiento se realizó con una báscula con capacidad para 100 kg. Además, se determinó el porcentaje de generación de cada tipo de residuo por cada sector (Ec. 2). Esta información fue tabulada en formatos diseñados para tal fin.

$$Wt = \sum_{i=1}^{i=n} Wi \quad (1)$$

$$\%Wi = \frac{Wi}{Wt} * 100\% \quad (2)$$

Donde:

Wt: Peso total de cada tipo de residuo

Wi: Peso de cada muestra según el tipo de residuo

%Wi: Porcentaje de generación de cada tipo de residuo

Una vez registrados los datos de la composición y peso de los residuos orgánicos de cada día, se obtuvieron los porcentajes promedio de cada tipo de residuo orgánico para los 10 días de muestreo.

4.3 Determinación del potencial bioquímico metanogénico de los residuos sólidos orgánicos generados en el barrio Moravia

4.3.1 Obtención de las muestras de residuos sólidos orgánicos

Los residuos fueron tomados de los puntos escogidos previamente pertenecientes al sector comercial, institucional e industrial. Se tomó una muestra representativa de residuos

sólidos orgánicos de cada punto con base en la caracterización y aforo realizado y estos fueron transportados hasta el Morro de Moravia donde se adecuó un espacio para la conformación de las muestras por sector.

Se siguió la metodología del cuarteo, la cual permite la conformación de las muestras de manera uniforme por sector para el total de los residuos. El procedimiento se llevó a cabo para cada sector, donde en un espacio plano se depositaron los residuos provenientes de cada punto y luego se realiza una mezcla de estos; posteriormente se hace una circunferencia lo más uniforme posible con todos los residuos depositados y se divide en cuatro partes iguales; de esta se extraen dos partes, las cuales se mezclan de nuevo, se realiza a continuación otra circunferencia y se divide de nuevo esta en cuatro partes iguales y se extraen dos cuartos y así sucesivamente hasta completar la muestra representativa [102]. La figura 6 detalla el método del cuarteo implementado y las imágenes 1, 2 y 3 muestran el procedimiento seguido.

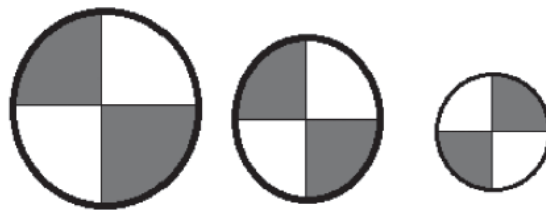


Figura 7. Método del cuarteo aplicado a los residuos sólidos orgánicos

Tomado de: [102]



Imagen 1. Aplicación del método del cuarteo



Imagen 2. Aplicación del método del cuarteo



Imagen 3. Conformación de muestras de residuos sólidos orgánicos

La muestra contó una cantidad de 3 kg de residuos sólidos orgánicos por sector, los cuales se llevaron al laboratorio del GIEM donde fueron triturados mediante una picadora eléctrica de residuos orgánicos modelo TR 200 marca TRAPP, obteniendo un tamaño de partícula menor a 10 mm. Posteriormente las muestras fueron empacadas herméticamente en bolsas plásticas y almacenadas a 4°C para su posterior caracterización.

Caracterización fisicoquímica de las muestras sólidas

Se determinaron parámetros fisicoquímicos en las muestras, lo cual permite identificar las características de estos, siendo de importancia en el análisis del potencial de aprovechamiento de los residuos. Los parámetros analizados corresponden a: Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Fijos (SF), pH, Nitrógeno Orgánico Total, Carbono Orgánico Oxidable Total y Relación Carbono – Nitrógeno.

Definición de mezclas y caracterización fisicoquímica

Se definieron cuatro mezclas diferentes entre los residuos sólidos orgánicos procedentes de cada sector, de las cuales se realizó la extracción del percolado para el montaje de las pruebas de potencial bioquímico metanogénico. Las mezclas se definieron con base en la producción de residuos orgánicos de cada sector y fueron caracterizadas bajo los siguientes parámetros: Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Fijos (SF), pH, Nitrógeno Orgánico Total, Carbono Orgánico Oxidable Total y Relación Carbono – Nitrógeno.

Extracción y caracterización fisicoquímica del percolado

Para la extracción del percolado se han construido estructuras denominadas “camas de percolación”, las cuales han sido adaptadas con accesorios de PVC y una malla de soporte donde reposan las mezclas de los residuos orgánicos en esta sólida y previamente trituradas. En la parte baja de la estructura se ha dejado un espacio para almacenar temporalmente el percolado y se instaló una válvula mediante la cual este es evacuado para su posterior almacenamiento (imágenes 4 y 5).

Las camas de percolación fueron instaladas en el Morro de Moravia, diariamente se hizo la extracción del percolado generado por cada una de las mezclas y este fue transportado hasta el laboratorio del GIEM. Se conformó una muestra compuesta para cada mezcla adicionando el percolado extraído en cada día. Este percolado es utilizado posteriormente en las pruebas de Potencial Bioquímico Metanogénico.

El percolado extraído de cada una de las mezclas conformadas en estado sólido fue almacenado a 4°C hasta su caracterización. Los parámetros que fueron analizados son: Sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles, pH, DQO, Carbono, Nitrógeno y relación Carbono – Nitrógeno.



Imagen 4. Adecuación de camas de percolación



Imagen 5. Extracción de percolado

4.3.2 Montaje de las pruebas de Potencial Bioquímico Metanogénico – PBM

Se realizaron los ensayos de Potencial Bioquímico Metanogénico del percolado extraído de las mezclas definidas en estado sólido.

Para el desarrollo de esta prueba y con base en los sólidos volátiles del percolado (sustrato) y del inóculo, considerando una relación de inóculo/sustrato (RIS) de 3g SV inóculo/g SV de sustrato, se definieron las proporciones de mezcla (inóculo:sustrato) a utilizar.

El montaje de las pruebas de PBM para cada proporción de mezcla definida se realizó por triplicado y con blancos por duplicado que contenían solo el inóculo permitiendo calcular la producción neta de metano.

Se siguió la metodología propuesta en la norma VDI [103], que consiste en usar reactores batch para determinar el potencial de producción de biogás y metano de un sustrato en específico. Utilizando botellas de vidrio con un volumen de 1100 ml que funcionan como reactores batch, se adicionó la proporción de mezcla establecida ocupando un volumen en cada botella de 600 ml y dejando un espacio libre para la cabeza de biogás de 500 ml. Cada botella se tapó con un corcho de caucho, tapa plástica y silicona. La tapa y el corcho fueron atravesados con una aguja donde se adaptó una válvula de tres pasos para monitorear la presión y cuantificar el metano producido (figura 7). Posteriormente, las botellas se purgaron con nitrógeno gaseoso para asegurar las condiciones anaerobias.

Las botellas fueron llevadas al baño maría a $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante dos horas para luego liberar el biogás presente, considerando este el tiempo inicial de la prueba. Finalmente, las botellas despresurizadas se han puesto en el baño maría durante un tiempo de operación de 30 días a $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

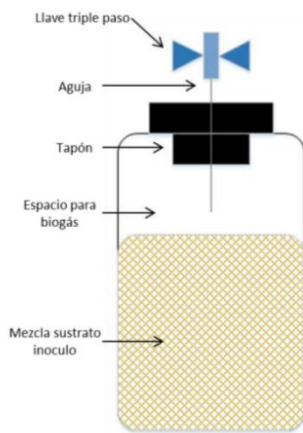


Figura 8. Esquema reactores batch

Tomado de: [31]



Imagen 6. Conformación de reactores batch para prueba de PBM



Imagen 7. Baño maría de reactores batch en prueba PBM

Diariamente cada botella se agitó manualmente una vez al día y se midió la presión del biogás por medio de un manómetro con un valor máximo de funcionamiento de 25 psi; posteriormente, el biogás se almacenaba en una bolsa plástica hermética Tedlar de 1 litro de capacidad, y con un equipo caracterizador de gases (RKI Instruments, modelo GX-2012) se determinaba el contenido de metano. Las imágenes 8 a 10 muestran el procedimiento seguido.

A las proporciones de mezcla definidas antes de la digestión se les realizó el análisis de los siguientes parámetros fisicoquímicos: Sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles, pH, DQO, Carbono, Nitrógeno y relación Carbono – Nitrógeno.



Imagen 8. Medición de presión en pruebas PBM



Imagen 9. Almacenamiento del biogás generado en pruebas PBM



Imagen 10. Caracterización del biogás generado en pruebas PBM

Inóculo

Se utilizó como inóculo lodo activado tomado de la salida del digestor anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando de la ciudad de Medellín Colombia. El lodo fue caracterizado bajo los parámetros: Sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles, pH y DQO. Se realizó un proceso de liberación del biogás endógeno del lodo a 35°C.

Cálculo del potencial de biometanización

El valor de producción de biogás de cada mezcla evaluada se determinó teniendo como referencia la norma VDI. La metodología llevada a cabo se presenta a continuación:

1. Se determinaron las moles biogás producidas por cada muestra de la mezcla (sustrato + inóculo) y del inóculo, cada día, utilizando la ley de los gases ideales:

$$\text{moles_Biogás} = \frac{PV}{RT}$$

Donde,

P: presión total medida por el transductor (Atm)

V: volumen del espacio de cabeza (0.4 L)

R: constante de los gases ideales (0.082 Atm*L/°K*mol)

T: temperatura del ensayo (°K)

2. Se obtuvo el volumen de biogás acumulado en condiciones estándar (0°C y 1 Atm), a partir de las moles de metano acumuladas, usando la ecuación de los gases ideales:

$$\text{volumen_Biogás_acumulado_}(L) = \frac{nRT}{P}$$

Donde,

n: moles acumulados de biogás

T: 273°K

P: 1 Atm

3. Para cada día, se obtuvo el volumen de biogás acumulado producido por gramo de sólidos volátiles de sustrato adicionado en la botella así:

$$\frac{L\text{Biogás}}{g\text{SVadicionado}} = \frac{\text{Volumen_Biogás_acumulada}(L)}{\left[\frac{\text{concentraciónSV}(g / kg)}{1000} \right] * [\text{cantidad_de_sustrato_adicionado}(g)]}$$

4. Posteriormente se realizó la gráfica de la producción de biogás acumulado (LBiogás/g SVadicionado) en función del tiempo.
5. Finalmente se determinó el porcentaje de metano con el equipo multiparamétrico de gases.

Análisis estadístico del PBM

Con el fin de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas evaluadas sobre la producción de biogás, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un nivel de significancia del 5%. Se considera como factor la variable independiente, que corresponde a cada una de las mezclas y como variable respuesta la variable dependiente, que corresponde a la producción de biogás y el porcentaje de metano. Las hipótesis evaluadas son H₀ (Hipótesis nula): No hay diferencia significativa entre la producción de biogás de las mezclas y H_a (Hipótesis alternativa): Hay una diferencia significativa en la producción de biogás entre al menos un par de mezclas. El análisis estadístico se realizó con el programa STATGRAPHICS Centurion XVI versión 16.1.02.

Métodos analíticos

En la tabla 6 se presentan los análisis realizados a las diferentes muestras de residuos sólidos orgánicos, percolado, inóculo y seguimiento del sistema en campo en las diferentes fases y la técnica y norma seguida para tal fin.

Tabla 6. Métodos analíticos de la caracterización fisicoquímica de las muestras

Parámetro	Técnica	Norma
Sólidos Totales	Gravimetría	SM 2540
Sólidos Fijos	Gravimetría	SM 2540
Sólidos Volátiles	Gravimetría	SM 2540
pH	Potenciometría	SM 4500
Nitrógeno Orgánico Total	Kjeldahl	4500-N _{ORG}
Carbono orgánico oxidable total	Titulometría	Método Walkley Black – NTC 5167
Demanda Química de Oxígeno – DQO _T	Reflujo cerrado-colorimétrico	Hach 8000
Ácidos Grasos Volátiles - AGV	Titulación pH-métrica	Método Kapp

4.4 Implementación del sistema de digestión anaerobia a escala piloto para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del barrio Moravia

Se implementó y evaluó el desempeño de un sistema de digestión anaerobia a escala piloto y el potencial en función de aprovechamiento de los coproductos generados: biogás, digestato y efluente. Para tal fin, en el Morro de Moravia se instaló un sistema de digestión anaerobia basado en el modelo desarrollado por el GIEM. El sistema instalado se basa en un proceso de digestión anaerobia en dos fases (sólido-líquido) operado por etapas, donde ocurren una serie de reacciones metabólicas como hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis por separado en diferentes reactores, contando además con una zona para la estabilización de la fracción sólida orgánica mediante compostaje.

4.4.1 Diseño e implementación del sistema

Para la construcción del sistema se ha partido de los recursos operativos, espacios e infraestructura disponible en el Morro de Moravia. Primeramente, se ha realizado una identificación de los espacios con el fin de determinar las zonas aptas para la instalación de cada uno de los procesos necesarios. Se buscó en primera instancia zonas de fácil acceso,

con una topografía que permitiera diseñar un sistema que funcionara en gran parte hidráulicamente por gravedad, además de materiales, equipos y demás infraestructura que pudiera ser adaptada a los requerimientos del sistema siempre y cuando fuera posible según las actividades de habilitación ambiental que allí se llevan a cabo. Partiendo de lo anterior, se diseñó, adaptó y construyó el sistema aprovechando las condiciones e infraestructura presente. Por lo tanto, en este estudio, la capacidad operativa del sistema está basada en la capacidad de los equipos presentes en el Morro de Moravia que fueron adaptados de acuerdo con los requerimientos y no en la carga orgánica de recepción inicial; se pretende que este estudio sea la base para el crecimiento paulatino del sistema con el fin de aumentar tanto la cobertura de recolección de residuos orgánicos separados en fuente como la alimentación del sistema hasta su máxima capacidad y la ampliación de este.

El sistema implementado consta de varias fases: La primera fase consiste en la recolección, recepción y pesaje de los residuos orgánicos; la segunda (pretratamiento) que consiste en la molienda de los residuos para disminuir el tamaño de la partícula y facilitar las fases siguientes; en la tercera fase se lleva a cabo la hidrólisis y acidogénesis dentro del reactor de hidrólisis (RH), generando como producto principal un percolado que es almacenado en un tanque pulmón (TP) y el producto sólido obtenido (digestato) es retirado y se lleva a un proceso de compostaje para su estabilización; en la cuarta fase el percolado se conduce por bombeo a los reactores metanogénicos (RM) donde ocurre la producción de biogás; posteriormente el biogás pasa por un proceso de limpieza, purificación y medición y se almacena en una bolsa especial para su posterior uso. El percolado es almacenado en un tanque, recirculando al RH una parte y la otra quedando disponible para su aprovechamiento. En la figura 8 se detalla el sistema desarrollado por el GIEM y adaptado en el Morro de Moravia.

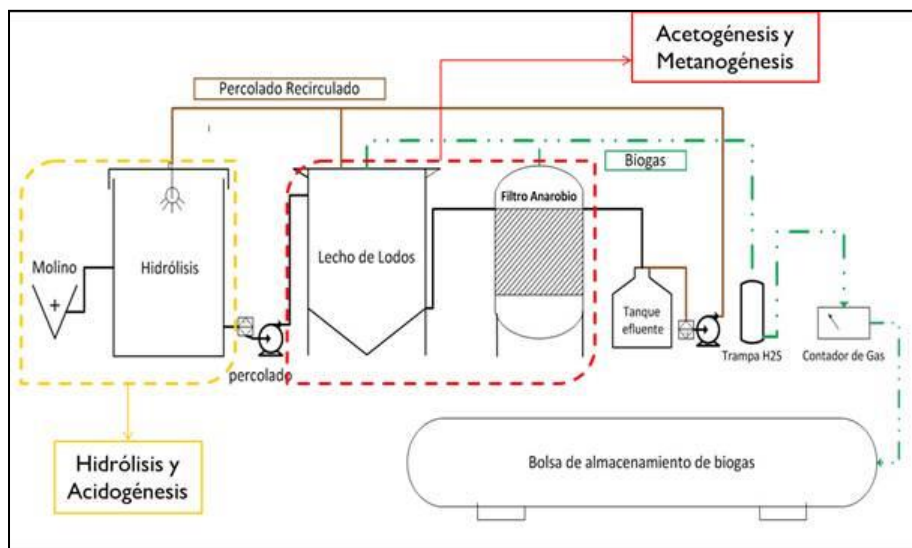


Figura 9. Esquema sistema de digestión anaerobia por etapas implementado y desarrollado por el GIEM

Tomado de: [25]

Adecuación de espacios en el Morro de Moravia

Con base en la identificación de los espacios disponibles en el Morro de Moravia, se realizó la adecuación de un espacio conocido como compostera, donde por condiciones de acceso al Morro es donde se hace la recepción de los residuos procedentes de los diferentes puntos generadores del barrio; a este espacio es llevado en el proceso final, la fase sólida resultante de los reactores de hidrólisis, donde mediante técnicas de compostaje se estabiliza la materia orgánica para su posterior aprovechamiento. Así mismo, se adecuaron caminos de tránsito carreteables con el fin de transportar los residuos orgánicos desde la compostera hasta la zona de picado, donde además se ubica el sistema de digestión anaerobia. En esta zona se realizó un cerramiento en malla galvanizada para dar protección a los equipos instalados y se ha dejado una proyección de espacio para la ampliación del sistema a futuro. En la figura 9, se muestra la ubicación al interior del Morro de Moravia de los puntos mencionados.

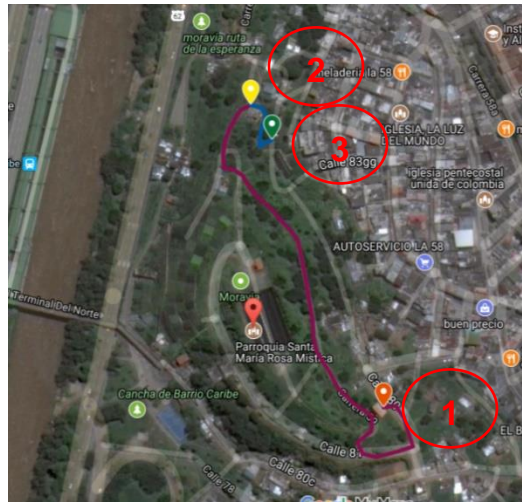


Figura 10. Ubicación de espacios en el Morro de Moravia

Punto 1. Ubicación de Compostera – zona de recepción. Punto 2. Adecuación de camino.

Punto 3. Zona de ubicación del sistema piloto de digestión anaerobia.

Entre Punto 1 y Punto 2 Corredor del arte y la memoria. Entre Punto 2 y Punto 3 Adecuación de nuevo camino.



Imagen 11. Centro de recepción de material orgánico - Compostera



Imagen 12. Adecuación de caminos carreteables



Imagen 13. Zona de picado y ubicación de reactores de hidrólisis

Picado (pretratamiento) de los residuos orgánicos

Para el picado de los residuos orgánicos se adquirió una picadora modelo TR 200 marca TRAPP, donde se obtiene un tamaño de partícula entre 6 mm y 10 mm, lo que facilita el proceso de hidrólisis. Para el funcionamiento de la picadora se instaló una acometida de agua para el lavado y una acometida eléctrica 110 v para su conexión.



Imagen 14. Picadora marca TR 200



Imagen 15. Proceso de picado de los residuos orgánicos

Reactores de hidrólisis – RH

Se adecuaron dos RH de 1 m³ cada uno, estos reactores corresponden a isotanques que fueron adaptados para facilitar la alimentación por la parte superior con los residuos orgánicos; a cada reactor se le instaló una barrera porosa a 30 cm de la base con el fin de retener el material sólido y permitir el paso del percolado que posteriormente por gravedad es conducido mediante tubería pvc al tanque pulmón.

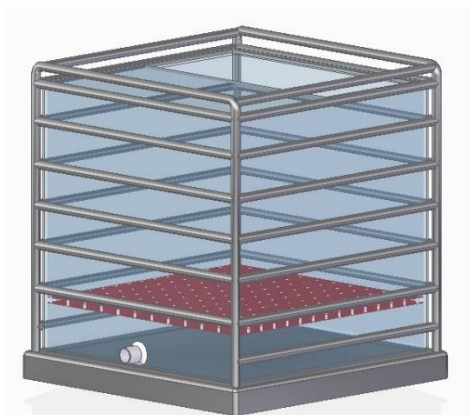


Figura 11. Esquema de adecuación de cada reactor de hidrólisis

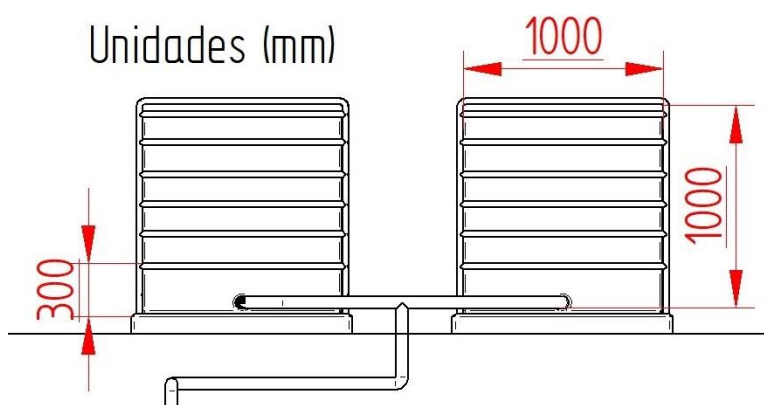


Figura 12. Dimensiones de los reactores de hidrólisis



Imagen 16. Adecuación e instalación de los reactores de hidrólisis

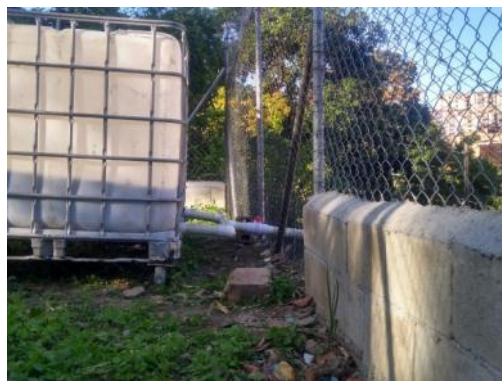


Imagen 17. Adecuación e instalación de los reactores de hidrólisis



Imagen 18. Malla de soporte de residuos picados



Imagen 19. Alimentación de los reactores de hidrólisis

Tanque pulmón – TP

El percolado generado en los RH es transportado por gravedad al TP donde se homogeniza la carga orgánica para posteriormente por medio de una bomba ser transportado hasta los RM. Se instaló un recipiente plástico de 55 galones de capacidad que funciona como TP, con una entrada en tubería pvc procedente de los RH y controlada por medio de una válvula.



Imagen 20. Ubicación tanque pulmón



Imagen 21. Entrada de percolado al tanque pulmón

Sistema de bombeo

Se instaló una bomba peristáltica marca STENNER modelo 45M5 programada con un temporizador para el encendido y apagado automático, encargada de transportar el percolado desde el tanque pulmón hacia la fase metanogénica. Para la instalación de la bomba se adecuó un espacio para darle protección que además sirve como soporte del tanque pulmón.



Imagen 22. Sistema de bombeo

Reactores Metanogénicos – RM

Esta etapa que corresponde a la fase líquida cuenta con dos reactores. Para la construcción de los RM se aprovecharon tanques que funcionaban como humedales artificiales en un sistema de tratamiento de lixiviados ubicado en el Morro de Moravia. Los tanques están fabricados en fibra de vidrio y contaban con diferentes accesorios en pvc y perforaciones para su operación en el tratamiento de lixiviados, por tal motivo, fue necesario realizar diferentes adecuaciones y ensamblar los tanques de tal manera que presentaran condiciones anaerobias y que contaran con los implementos necesarios para su operación como RM tipo lecho de lodos; el volumen de los reactores está dado por las adaptaciones realizadas y la capacidad de los tanques aprovechados.

Los RM corresponden a dos lechos de lodos, con un funcionamiento en serie y configurados igualmente, contando con una entrada para el percolado en la parte superior, una salida de percolado en la parte lateral, dos válvulas de purga en la parte inferior y una salida de biogás en la parte superior; el flujo del percolado al interior de los reactores se da de manera ascendente. En la tabla 7 se muestran las características de cada RM instalado.

Tabla 7. Características de los reactores metanogénicos

Variable	Unidad	RM1	RM2
Altura total	m	2,39	2,39
Diámetro	m	1,30	1,30
Área	m ²	1,33	1,33
Volumen total	m ³	3,17	3,17
Volumen útil	m ³	2,81	2,68
Volumen cabeza de gas	m ³	0,36	0,49

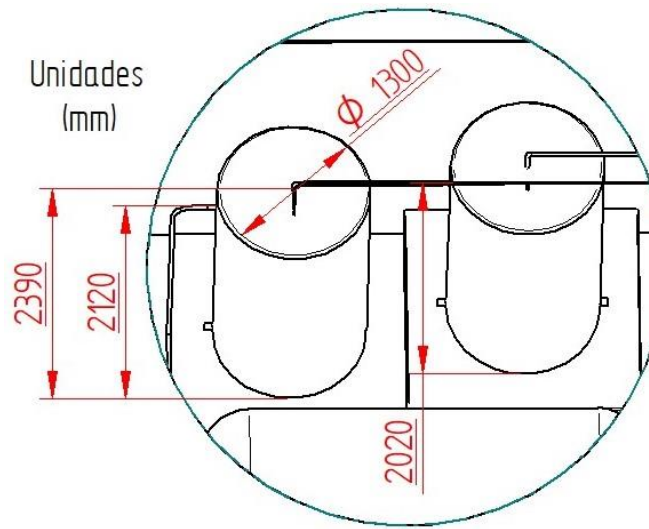


Figura 13. Medidas de los reactores metanogénicos

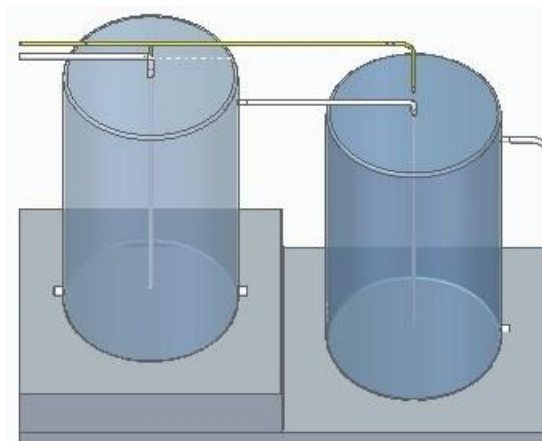


Figura 14. Esquema de los reactores metanogénicos adecuados



Imagen 23. Adecuación interior de los reactores metanogénicos



Imagen 24. Construcción de los reactores metanogénicos



Imagen 25. Adecuación entrada de percolado y salida de biogás en los reactores metanogénicos



Imagen 26. Adecuación de los reactores metanogénicos

Tanque de almacenamiento del efluente

Se tomó como sitio de almacenamiento del efluente un tanque sedimentador ubicado en el Morro de Moravia, el cual hacía parte de un sistema de tratamiento de lixiviados y fue adaptado para los requerimientos del sistema de digestión anaerobia. Se ha instalado tubería pvc que transporta por gravedad el percolado de la salida del RM2 hasta este punto, implementando válvulas de control y puntos de monitoreo. El tanque está construido en fibra de vidrio, se encuentra enterrado y cuenta con un volumen de 1.5 m³.



Imagen 27. Adecuación tubería en el tanque de almacenamiento de efluente



Imagen 28. Tanque de almacenamiento de efluente

Limpieza y medición de generación del biogás

Se instaló tubería PE-AL-PE de $\frac{3}{4}$ de pulgada para conducir el biogás desde los reactores metanogénicos hasta el sistema de limpieza que consta de una trampa de humedad y seguidamente una trampa de H_2S para posteriormente pasar por el medidor y luego ser almacenado. La trampa de humedad se ha construido con pvc, donde por un proceso de condensación la humedad que está contenida en el biogás es retenida y posteriormente es evacuada por la parte inferior. Para la remoción del H_2S se instalaron dos trampas construidas en pvc que funcionan en paralelo, a las cuales se les adicionó limadura de hierro oxidada. El sistema de medición consta de un medidor marca Gold Card modelo G1.6 por medio del cual se cuantifica el volumen de biogás producido.



Imagen 29. Sistema de limpieza del biogás



Imagen 30. Trampa de humedad



Imagen 31. Trampa de H₂S



Imagen 32. Conexión sistema de limpieza y medición del biogás



Imagen 33. Medidor de biogás

Almacenamiento del biogás

Para el almacenamiento del biogás se adquirió e instaló una bolsa cilíndrica marca Shemi de 2 metros de diámetro y 3,8 metros de largo, la bolsa corresponde a una geomembrana reforzada, con soporte de fibra de poliéster de alta tenacidad, con recubrimiento por ambas

caras con resina plástica de PVC y aditivos generando protección ante hongos, con resistencia a rayos solares y a diversos productos químicos. Cuenta con dos entradas en tubería PVC para biogás y tres salidas.



Imagen 34. Bolsa de almacenamiento de biogás

4.4.2 Cálculo de parámetros operacionales

Con base en el aprovechamiento de la infraestructura existente en el Morro de Moravia, la adaptación de los espacios y equipos disponibles y considerando la capacidad de estos, se calculó la capacidad de operación del sistema. Para tal fin, se han tenido en cuenta los parámetros operacionales del sistema de digestión anaerobia implementado en el relleno sanitario del municipio de El Carmen de Viboral por el GIEM, el cual cuenta con la misma configuración al implementado en este estudio y es alimentado con residuos orgánicos urbanos.

Los cálculos se hicieron para el volumen disponible de los equipos instalados, sin embargo, en el momento de desarrollo de este estudio, no se contó con la capacidad de residuos orgánicos para cumplir con la alimentación que puede soportar el sistema, lo que dependió de los procesos de separación en la fuente; así mismo, se buscó en principio operar el sistema a baja carga orgánica y paulatinamente a medida que el sistema mostrara estabilidad, aumentar la alimentación; por lo tanto, también se realizaron los cálculos de acuerdo a la operación desarrollada.

Primeramente, se realizaron los cálculos para el volumen total disponible con el fin de determinar la máxima operación del sistema; para este caso se consideró TRH de 25 días con base en lo reportado por el GIEM.

Finalmente, se determinaron los parámetros operacionales considerando la carga máxima con que fue alimentado el sistema en este estudio, teniendo en cuenta el caudal manejado y el volumen de los reactores.

Tabla 8. Ecuaciones para determinar los parámetros de operación en el sistema de digestión anaerobia.

Caudal (Q) (m ³ /día)	$Q = V/TRH$
Tiempo de retención hidráulico (TRH) (días)	$TRH = V/Q$
Velocidad de carga orgánica (OLR) (kg DQO/m ³ día)	$OLR = DQO_{in}/TRH$

Donde:

TRH: Tiempo de retención hidráulico (días)

V: Volumen de trabajo de la fase metanogénica (m³)

Q: Caudal de operación del sistema (m³/día)

OLR: Tasa de carga orgánica (kg DQO/m³ día)

DQO_{in}: Demanda Química de Oxígeno en el influente (mg O₂/L)

Ensamble del sistema

El sistema se ensambló con tubería pvc para la circulación del percolado en todo el proceso y tubería PE-AL-PE para el biogás.

4.4.3 Puesta en marcha y operación del sistema

Inoculación de los rectores metanogénicos

La primera fase de la puesta en marcha del sistema consistió en la inoculación de los RM con el fin de acelerar la etapa de arranque. Como inóculo se utilizó lodo digestado obtenido de la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando de la ciudad de Medellín. Aproximadamente el 70% del volumen útil de cada RM fue cargado con el inóculo y agua en una proporción 1:7; esta mezcla fue caracterizada bajo los parámetros fisicoquímicos: Sólidos totales, Sólido Volátiles, Sólidos Fijos y pH. Los RM se terminaron de llenar hasta su volumen útil con percolado diluido con agua, garantizando un pH neutro en la mezcla, para lo cual fue necesario previamente cargar los RH con residuos orgánicos con el fin de obtener suficiente percolado. Seguidamente los RM se dejaron cargados durante 24 horas para alcanzar la climatización [104], las válvulas de entrada y salida de percolado a los RM permanecieron cerradas durante este tiempo, pasadas las 24 horas se comenzó el flujo de percolado a través del sistema.

Recolección de los residuos sólidos orgánicos

De acuerdo con la identificación de los generadores y considerando las características de los residuos generados, cantidad, disponibilidad y disposición de los puntos generadores de participar en esta fase, se llevó a cabo la recolección de los residuos orgánicos en los puntos previamente seleccionados. Inicialmente se llevaron a cabo campañas de educación en la separación adecuada de la fracción orgánica, de tal manera que se tuviera un almacenamiento en recipientes que facilitaran su recolección y transporte.

El proceso de recolección y transporte se llevó a cabo por personal operativo del proyecto de habilitación ambiental del Morro de Moravia; los residuos previamente separados son recogidos en canecas plásticas y transportados en carretas hasta el punto definido en el Morro y posteriormente se determina el peso de estos; esto se lleva a cabo de lunes a viernes debido a la disponibilidad de los residuos y del personal operativo que desarrolla las labores.

Alimentación del sistema

Posterior a la recolección los residuos son sometidos al proceso de molienda de acuerdo con la disponibilidad de estos. Seguidamente se alimentan de forma manual los RH, los cuales funcionan en paralelo, siendo alimentados de lunes a viernes con un periodo de retención de sólidos de máximo 7 días; posterior a este tiempo el material sólido (digestato) es retirado de forma manual y llevado hasta la compostera de manera carreteable para terminar su estabilización mediante compostaje.

El percolado generado en los RH se conduce por gravedad hasta el TP y posteriormente es conducido hacia los RM; esta alimentación se hace en pulsos por la bomba hidráulica, operando 15 minutos en continuo cada 2 horas, para un total de operación de 3 horas al día. El caudal de bombeo es controlado de acuerdo con los requerimientos en la operación del sistema, el cual se aumenta o se disminuye, buscando una estabilidad en los RM en cuanto a la relación AGV/Alk y pH.

La fase metanogénica fue alimentada inicialmente con un caudal de 20 L/día de percolado procedente del tanque pulmón, el cual entra al RM1 por la parte superior impulsado por la bomba hidráulica y por rebose desplaza el exceso hacia el RM2 y de este se desplaza el exceso de lodo hacia el TP; en la medida en que los RM mostraban una buena operación, se incrementó la alimentación hasta 36 L/día de percolado, siendo las condiciones máximas de operación a las que se llegó en este estudio, debido a la cantidad de residuos orgánicos disponibles y a la capacidad biológica inicial del sistema.

Recirculación de efluente

En el momento de considerarse necesario la recirculación del efluente por bajo volumen de percolado en el TP o bajos valores de pH en este, se hace recirculación manual desde el tanque de almacenamiento hasta los RH o TP de acuerdo con las necesidades; el volumen de recirculación varía con base en los requerimientos.

Estabilización de la fase sólida – Compostaje

La fracción sólida procedente de los RH es retirada de forma manual y transportada por medio de carretas hasta la compostera para ser sometida a procesos de compostaje con el fin de estabilizar la materia orgánica y obtener un coproducto que pueda ser usado como abono orgánico. Para esto se realiza un proceso mediante pilas, las cuales se conforman con aserrín en una relación 3:1 (3 partes de residuos orgánicos:1 parte de aserrín), realizando dos volteos por semana en un periodo de 60 días. Posterior a este tiempo y cuando el material está estabilizado, queda a disposición para su aprovechamiento, previo análisis fisicoquímico y microbiológico.

4.4.4 Monitoreo del sistema

Para el monitoreo del sistema se instalaron diferentes puntos de muestreo distribuidos de tal manera que permitan el seguimiento de cada una de las fases; estos puntos fueron instalados con accesorios de pvc para el seguimiento al percolado y accesorios PE-AL-PE para el seguimiento al biogás. En la figura 14 se muestran los puntos de monitoreo en el sistema.

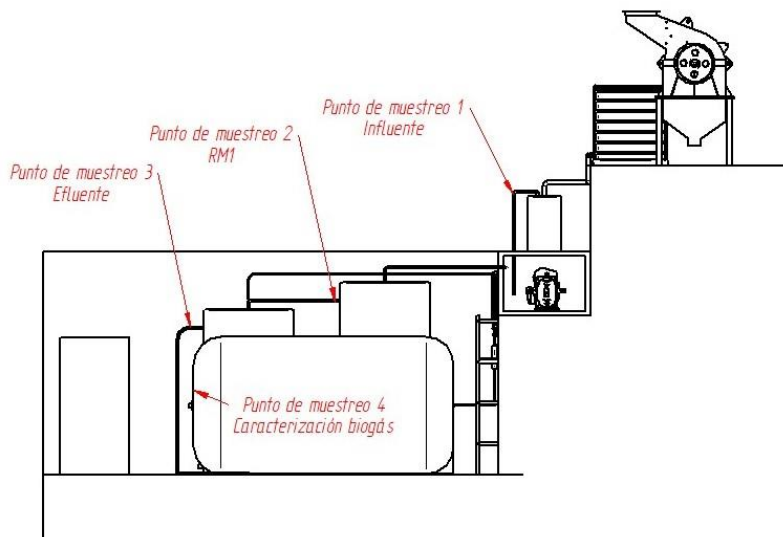


Figura 15. Puntos de monitoreo del sistema

En la etapa de arranque el seguimiento de las variables se realizó una vez por semana, en la etapa de operación este se hizo una vez cada 15 días. Se monitoreó el comportamiento

de la carga orgánica a través del digestor mediante el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos volátiles (SV). Además, se determinaron parámetros de estabilización como pH y relación AGV/Alk. El monitoreo se realizó en el influente, salida del RM1 y efluente (salida del RM2) y la relación AGV/Alk fue monitoreada a la salida del RM1 y efluente; todos los análisis se realizan por triplicado. El sistema es operado a temperatura ambiente que corresponde a un rango mesófilo.

El sistema se considera estable al periodo de tiempo en el que las tasas de remoción y producción de biogás tienen una baja variabilidad [105], este comportamiento debe estar asociado a una baja relación AGV/Alc con valores por debajo de 0,5 para los RM, pH superior a 6,5 y una baja concentración de DQO y SV en el efluente en comparación con el influente [38, 53].

La operación del sistema se hizo por 200 días y el seguimiento se realizó por un tiempo de 180 días considerando el proceso de recolección, transporte, recepción y pesaje de los residuos orgánicos.

En la tabla 9 se detallan los parámetros evaluados y el punto de monitoreo. Las variables fueron caracterizadas de acuerdo con los métodos mencionados en la tabla 6. El volumen de biogás fue determinado con un contador volumétrico y el porcentaje de metano con un equipo caracterizador de gases (RKI Instruments, modelo GX-2012). Las muestras fueron transportadas hasta el laboratorio del GIEM y almacenadas a 4°C hasta su posterior análisis. Además de los análisis de laboratorio, se realizó el seguimiento a la cantidad de residuos orgánicos con que es alimentado el sistema, la cantidad de digestato obtenido y efluente.

Tabla 9. Parámetros monitoreados en el sistema

Variable	Punto de monitoreo
Sólidos Totales – ST	Influente - Salida RM 1- Efluente
Sólidos Volátiles – SV	Influente - Salida RM 1- Efluente
Sólidos fijos – SF	Influente - Salida RM 1- Efluente
pH	Influente - Salida RM 1- Efluente
DQO	Influente - Salida RM 1- Efluente
AGV/Alc	Salida RM 1- Efluente
Volumen de biogás	Medidor de gas
% CH ₄	Bolsa de almacenamiento de biogás

4.5 Potencial de aprovechamiento energético y material

Los coproductos obtenidos del sistema de digestión anaerobia implementado corresponden a una fase sólida extraída de los RH y que fue sometida a procesos de estabilización mediante compostaje, un efluente y el biogás con contenido de metano; estos coproductos fueron evaluados para determinar su potencial de aprovechamiento.

Biogás

Se determinó el potencial de aprovechamiento del biogás teniendo en cuenta las condiciones de mayor estabilidad en el sistema de digestión anaerobia con un contenido de metano del 70%. De acuerdo con diferentes datos reportados por el GIEM para el aprovechamiento energético del biogás, se determinó el poder calorífico (Cp) en términos de kcal/m³; partiendo de este Cp se realizaron las conversiones necesarias tanto a BTU y kw. Considerando estos valores, se calculó el potencial de aprovechamiento calórico y eléctrico para diferentes equipos en término de m³ de biogás/hora teniendo en cuenta el consumo energético reportado en la literatura para cada equipo y el Cp del biogás.

Fracción sólida estabilizada mediante compostaje y fluente

Posterior al proceso de compostaje llevado a cabo, se tomaron muestras del material maduro para su análisis fisicoquímico y microbiológico con el fin de determinar las características para su aprovechamiento como enmienda orgánica. Se tomó 1 kilogramo de muestra la cual fue transportada hasta el laboratorio del GIEM donde posteriormente por parte de la línea de servicios se realizó la caracterización.

El efluente tal y como se obtiene del sistema fue caracterizado bajo parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para determinar su potencial de aprovechamiento como fertilizante líquido. Se tomó 1 litro de la muestra que fue llevada hasta el laboratorio del GIEM para su posterior caracterización por parte de la línea de servicios.

Los parámetros se determinaron con base en los criterios establecidos en la Norma Técnica Colombiana – NTC 5167 [106] que regula en Colombia la clase de fertilizantes y los parámetros que se deben cumplir en estos.

5. Resultados

5.1 Identificación de los generadores de residuos sólidos orgánicos en el barrio Moravia

En primera instancia se contó con información suministrada por el Departamento Administrativo de Planeación (DAP) de la Alcaldía de Medellín, el cual cuenta con la identificación de los diferentes sectores que confluyen en el barrio Moravia; la información suministrada corresponde a la identificación del sector comercial e industrial para los años 2010 y 2013. Para el año 2010 la información corresponde a la registrada en la cámara de comercio, donde se contó con 112 establecimientos comerciales registrados y 23 establecimientos catalogados como industrias, además reportan 8 puntos dedicados al reciclaje y 21 de servicios [98]. La información correspondiente al año 2013, siendo esta la más actualizada con que cuenta el DAP, se basa en el trabajo de campo realizado por este departamento, donde se contaba con 813 establecimientos comerciales y 26 industrias; en esta última clasificación no se cuenta con los puntos de reciclaje ni de servicios, además hay cambios en la clasificación de algunos puntos con respecto al 2010 [98]. Para ambos casos no se contó con el tipo de actividad asociada, siendo complejo determinar así los potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos. Se evidencia además que existe en su gran mayoría actividades comerciales informales. Por disposición del DAP no es posible publicar los mapas entregados, ya que en el momento del desarrollo de este estudio la información suministrada no era pública, la cual está en el marco del Plan Parcial del barrio Moravia.

De esta información se logra identificar que el comercio básico en el barrio se ubica principalmente en los garajes con actividades como graneros, tiendas, salsamentarías, legumbreras, misceláneas, licoreras, droguerías, entre otras actividades; en las vías de alto tráfico vehicular se dan actividades comerciales, industriales y de servicios como talleres, mantenimiento de vehículos, chatarrerías, ferreterías, entre otros. En los principales corredores económicos se presenta una mezcla entre unidades productivas formales e informales abasteciendo un mercado de escala barrial variando la demanda entre ellos; la carrera 55 “El huequito de Moravia” es uno de los principales corredores económicos donde se da la presencia de establecimientos de comercio como almacenes especializados en calzado, ropa, juguetería, supermercados, entre otros. Se destaca así mismo en el barrio la presencia de establecimientos como servicios odontológicos, salones de belleza, barberías, consultorios médicos, actividades de juegos de azar y empresas asociadas a las confecciones, aprovechamiento de materiales, salones sociales e instituciones educativas [98].

Hay una fuerte presencia de actividades comerciales en el territorio, con alta concentración en la zona del bosque. Las actividades más sobresalientes son las que tienen que ver con el comercio minorista en pequeña escala de venta de productos como: alimentos, víveres y abarrotes, es decir, hay un predominio en los formatos de tiendas de barrio, almacenes y

minimercados, además de una amplia diversidad de almacenes de variedades. Las actividades industriales no se destacan en estar relacionadas con la gran industria ni tampoco de base tecnológica, sino aquellas relacionadas con la fami-industrias y de tipo artesanales, además de confecciones, cuero y calzado, cerrajerías, carpinterías, ebanisterías e industrias del reciclaje [98].

Partiendo de la información anterior y considerando que, aunque se tenga una clasificación sectorial, no se cuenta con el tipo de actividad asociada a cada punto, además que la dinámica económica en el barrio pudo tener alta variabilidad desde el año 2013 al 2017, se decide realizar recorridos por el barrio con el fin de validar la información suministrada e identificar directamente los establecimientos que sean potenciales generadores de residuos orgánicos.

De acuerdo con este levantamiento de información, se logró identificar 34 generadores potenciales de residuos sólidos orgánicos distribuidos en los sectores previamente establecidos (Comercial, institucional e industrial). La información recopilada se resume en la tabla 10, donde se presenta el nombre del establecimiento, dirección, tipo de sector y subsector de acuerdo con su actividad económica.

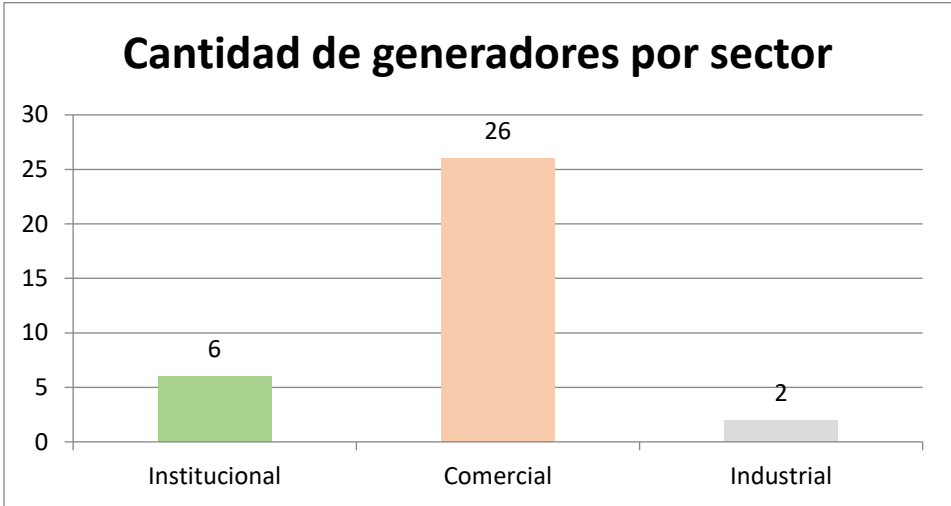
Tabla 10. Potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos identificados en el barrio Moravia

NOMBRE	CLASIFICACIÓN	SUBSECTOR	DIRECCIÓN
BUEN COMIENZO "MAMA CHILA"	Institucional	Jardín infantil	Cra. 57#84-68
HOGAR INFANTIL BALANCINES	Institucional	Jardín infantil	Cra. 58#84-18
CENTRO INFANTIL BELLA INFANCIA	Institucional	Jardín infantil	Cra. 58#85b-55
JARDIN BUEN COMIENZO MORAVIA	Institucional	Jardín infantil	Cra. 54c#81f-34
I.E FE Y ALEGRÍA LUIS AMIGÓ	Institucional	Institución Educativa	Cra. 58 #84-40
I.E EL BOSQUE	Institucional	Institución Educativa	Cra. 58#85e-81
SUPERMERCADO LA 80	Comercial	Mercado	Cra. 55 #80-28
LEGUMBRERIA EL GORDO	Comercial	Mercado	Clle. 80b#54b-05
BRASAS	Comercial	Restaurante	Clle. 80b#54b-06
GRANERO LA REBAJA	Comercial	Mercado	Cra 55#80bb-27
LA MANO DE DIOS	Comercial	Mercado	Clle. 82a#54c-7
GUARDADERO LA MONA	Comercial	Mercado	Clle. 81f#52-65

NOMBRE	CLASIFICACIÓN	SUBSECTOR	DIRECCIÓN
FRUVER LOS SANCHEZ	Comercial	Mercado	Clle. 81f#52-71
PASTEL Y QUESO	Comercial	Restaurante	Cra. 52#78-77
TOLDO DE PAPAS A	Comercial	Restaurante	-
TOLDO DE PAPAS B	Comercial	Restaurante	-
RESTAURANTE DONDE CHARLY	Comercial	Restaurante	Cra. 58#86-28
MERCADO RENTERIA	Comercial	Mercado	Cra. 58#86a-20
COMBIPOLLO	Comercial	Restaurante	Cra. 55#80bb-17
MODULO 3	Comercial	Mercado	Cra. 58#83d-09
TIENDA EL CHACO	Comercial	Mercado	Cra. 57a#83b-240
GUARDADERO EL TERNERO	Comercial	Mercado	Clle. 85b#57-61
EL REY DEL BUEN GUSTO	Comercial	Restaurante	Cra. 58#86-14
PIO POLLO	Comercial	Restaurante	Cra. 58dd#84a-24
DELICIAS DE LUPE	Comercial	Restaurante	Cra. 58dd#84a-23
BRASITAS DE MORAVIA	Comercial	Restaurante	Cra. 58dd#84a-19
BODEGA DE BANANO	Comercial	Mercado	Cra. 58dd83ee-44
DISTRIBUIDORA DE AGUACATE	Comercial	Mercado	Cra. 58dd#83e-24
RESTAURANTE ALEX	Comercial	Restaurante	-
MEZON DE LA 55	Comercial	Restaurante	Cra. 55#80-39
LEGUMBRERIA VERDOLAGA	Comercial	Mercado	Cra. 56#79-10
PIPE POLLO	Comercial	Restaurante	Cra. 52#80-11
DIOSA AREPAS	Industrial	Producción de arepas	Clle. 80bb#55-54
M&C ALIMENTOS	Industrial	Producción de pulpas	Clle. 79#55b-69

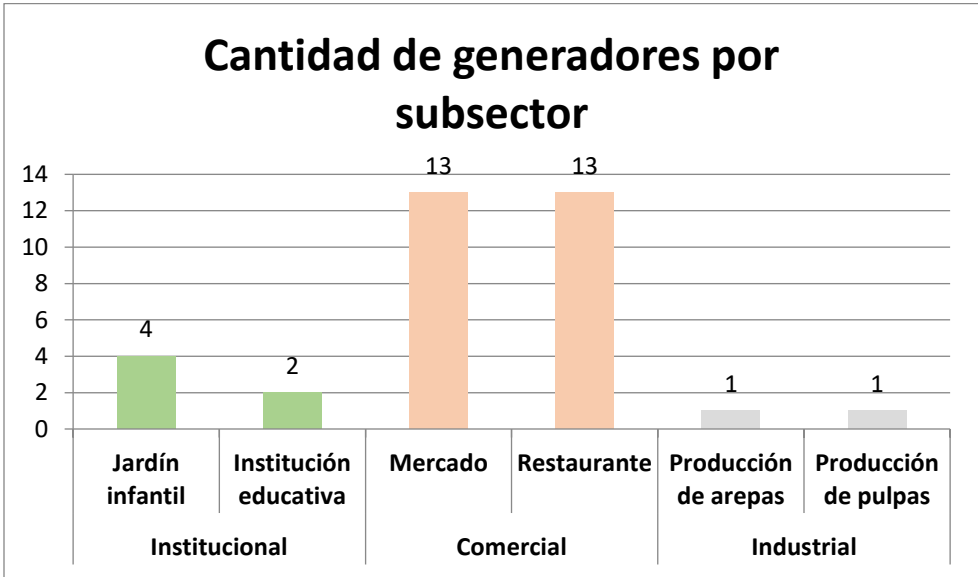
Se recalca la alta actividad comercial en el barrio Moravia, donde de acuerdo con el tipo de actividad económica, gran parte de los establecimientos comerciales no generan una porción importante de residuos sólidos orgánicos; así pues, los establecimientos comerciales que generan residuos orgánicos en gran cantidad corresponden a mercados y restaurantes. Se evidencia así mismo, la baja presencia de actividad industrial que genere residuos orgánicos como fracción principal, estando la mayoría de los procesos industriales ligados al procesamiento de materiales reciclables. Dentro del sector institucional se identificaron diferentes puntos entre los que se encuentran centros de salud, atención al adulto mayor, atención ciudadana, entre otros, donde se consideran como generadores potenciales los puntos que corresponden a instituciones educativas y jardines infantiles.

En la gráfica 1, se resume la cantidad de puntos identificados por sector, donde en su mayoría corresponde a establecimientos comerciales de mediana y pequeña escala, seguido por establecimientos correspondientes al sector institucional y por último el sector industrial con pequeñas empresas.



Gráfica 1. Cantidad de generadores por sector

Dentro de la clasificación por sector, se realizó una clasificación por subsector, el cual se detalla en la gráfica 2. Esto permite determinar en primera instancia el tipo de residuo que se puede estar generando, su estado y su posibilidad de aprovechamiento.



Gráfica 2. Cantidad de generadores por subsector

En el sector comercial como se mencionó anteriormente, se encuentra la mayor cantidad de generadores identificados, donde de acuerdo a la clasificación por subsector estos están

incluidos principalmente entre mercados y restaurantes; en los primeros hay mayor generación de residuos de frutas, verduras y vegetales frescos, encontrando locales que se dedican a la distribución de frutas para ventas carreteables, puntos de almacenamiento de frutas, vegetales y verduras, pequeñas tiendas de venta y supermercados, recalcando que en algunos casos un establecimiento puede tener varias sedes dentro del barrio. Para el caso de los restaurantes se logró identificar puntos ambulantes de venta de comida procesada, puntos de venta exclusivamente de pollo, panaderías y restaurantes en general. Es importante considerar que hay otra cantidad de ventas ambulantes de comida procesada que no se ha tenido en cuenta en este levantamiento, debido que su actividad está diseñada específicamente para los fines de semana en horas nocturnas y el procesamiento de los alimentos se realiza en las viviendas donde los residuos generados son dispuestos junto con los residenciales.

La ubicación de cada uno de los puntos identificados se muestra en la figura 15. En color rojo se ubican los puntos que corresponden al sector comercial, en azul el sector industrial y en verde los correspondientes al sector institucional. En la zona norte del barrio se ubican principalmente tiendas que se considera que no generan una cantidad importante de residuos orgánicos; en esta zona se contó con dificultades para el acceso, por lo que el estudio tiene limitaciones en esta parte del barrio.

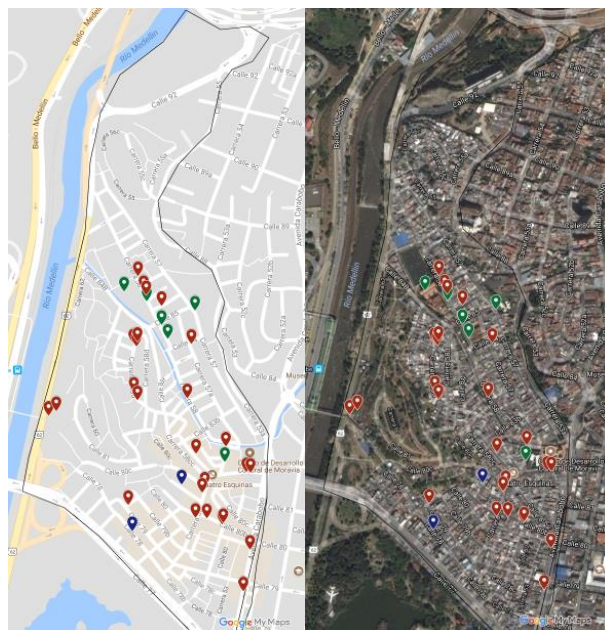


Figura 16. Ubicación de puntos del sector comercial, industrial y oficial identificados en recorridos por el barrio

5.1.1 Resultados de la aplicación de la encuesta a los potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos

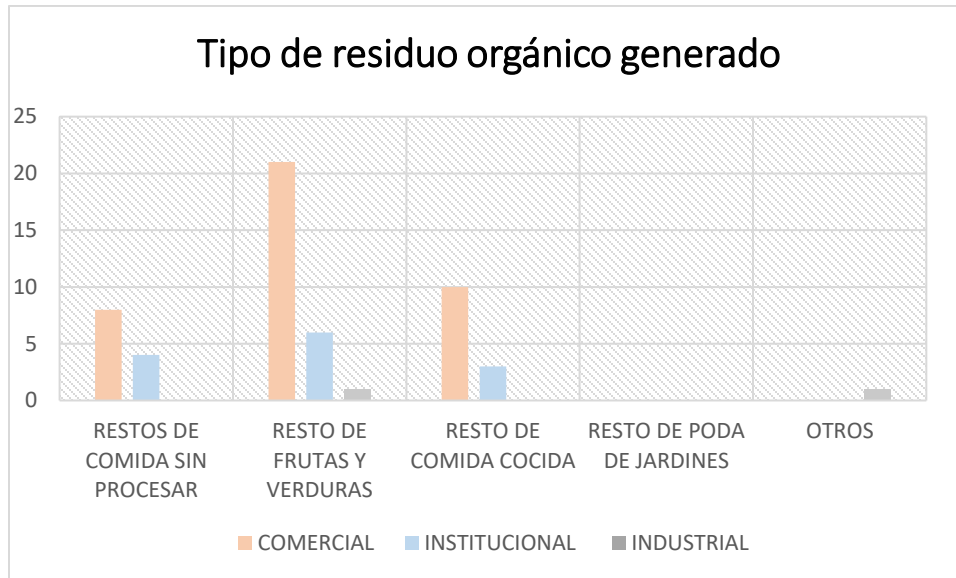
La encuesta sobre la generación y manejo de residuos orgánicos fue aplicada en cada uno de los puntos identificados en los recorridos realizados; esta ha permitido obtener información para el desarrollo de las etapas futuras, donde se considera el tipo de residuo orgánico que se genera, la frecuencia de generación y disponibilidad de residuos, así mismo, la capacidad de los generadores para participar de este tipo de procesos. La encuesta se aplicó a la persona encargada de cada punto de acuerdo con el sector. A continuación, se hace una descripción de los resultados de esta encuesta, los cuales están divididos por cada sector (comercial, industrial e institucional).

Se ha indagado en primera instancia sobre el tipo de residuos orgánicos que se generan en las actividades desarrolladas en cada punto, considerando todos los procesos que se llevan a cabo; los resultados para esta pregunta se presentan en la gráfica 3.

Es posible afirmar que en su mayoría los puntos identificados son generadores de residuos de restos de frutas, verduras y vegetales en estado fresco, siendo estos generados en los tres sectores priorizados y estando mayormente relacionados con el sector comercial. Es importante mencionar que un punto puede generar varios tipos de residuo orgánico, debido a que, de acuerdo con su actividad económica, el residuo se genera en diferente estado dependiendo del proceso desarrollado, por ejemplo, para el caso de los restaurantes, ya sean escolares o comerciales, se generan restos de frutas, verduras y vegetales en estado fresco en el proceso de picado y pelado de productos, así mismo hay generación de restos de comida cocida producto de las sobras.

Para el caso del sector industrial, uno de los puntos ha catalogado los residuos orgánicos generados dentro de la clasificación “otro tipo de residuos”, estos corresponden a desechos de maíz producto de la fabricación de arepas, que pueden estar incluidos tanto en residuos sin procesar como procesados cuando de las actividades posteriores a la cocción.

De acuerdo con la encuesta, no hay generación en ninguno de los puntos de restos de poda de jardines, esto se relaciona igualmente con la poca presencia de zonas verdes en el barrio Moravia a excepción del Morro de Moravia.



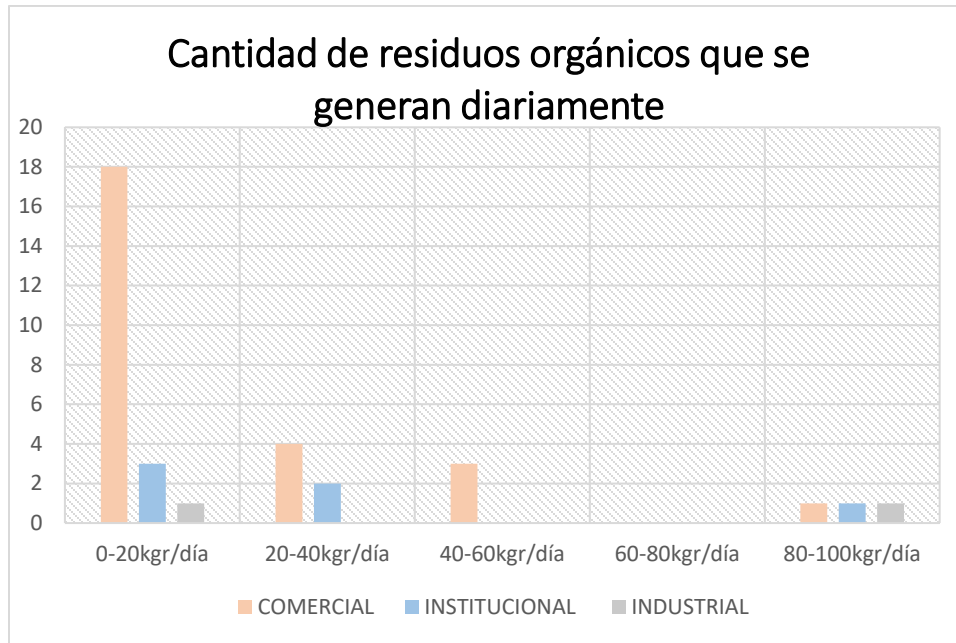
Gráfica 3. Resultados encuesta sobre el tipo de residuos orgánicos generados

Partiendo del tipo de residuo orgánico generado, se preguntó a los generadores sobre el conocimiento de la cantidad que generaban de estos, los resultados se resumen en la gráfica 4. Para efectos de análisis de la información, se establecieron cinco rangos de generación posterior a la encuesta aplicada: 0 – 20kg/día, 20 – 40 kg/día, 40 – 60 kg/día, 60 – 80kg/día y 80 – 100kg/día. Cabe resaltar que en la mayoría de los casos los valores obtenidos fueron estimados por las personas a las cuales se les aplicó la encuesta, debido que son pocos los puntos donde se cuenta con un registro de producción, siendo principalmente los generadores pertenecientes al sector institucional los que realizan este proceso.

De acuerdo con estos datos es posible afirmar que la generación más alta de residuos sólidos orgánicos corresponde al sector comercial, donde la mayoría de los generadores están en el rango entre 0 – 20kg/día, en este mismo rango se encuentra el mayor número de generadores del sector institucional y la mitad del sector industrial. Así pues, los puntos identificados en su mayoría tienen una generación entre 0 y 20 kg/día.

Es importante resaltar la producción entre 80 y 100kg/día que se da en uno de los puntos del sector industrial donde hay procesamiento de frutas para la elaboración de pulpas, en el supermercado la 80 perteneciente al sector comercial y en un punto del sector institucional, que corresponde a un jardín infantil, en este último se lleva registro día a día de la producción.

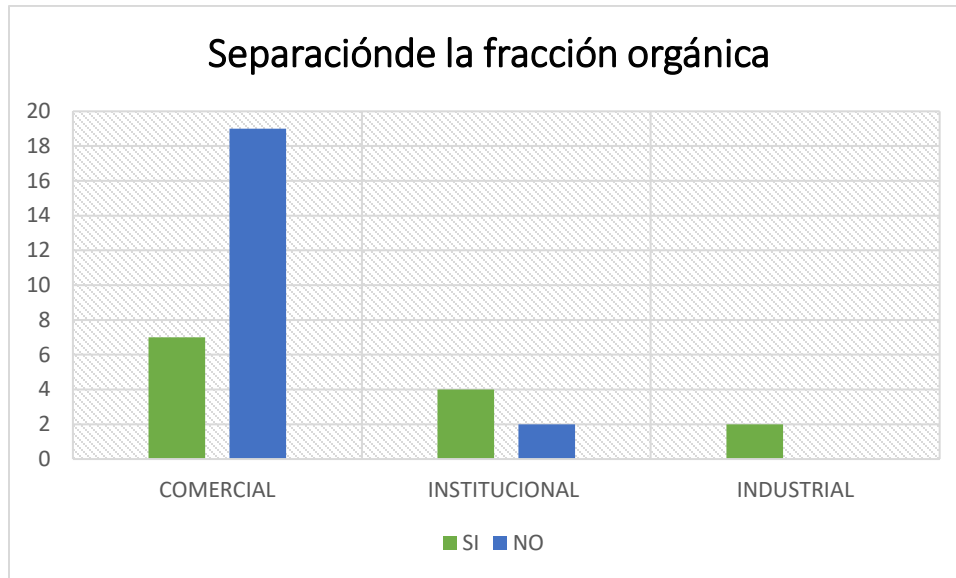
Los valores de producción diaria de residuos orgánicos se estimaron posteriormente en el proceso de caracterización y aforo realizado en cada uno de los puntos, siendo los resultados mostrados en la gráfica 4 los suministrados en la encuesta.



Gráfica 4. Resultados encuesta sobre la cantidad de residuos orgánicos producidos

Seguidamente se indagó a cerca de la separación en la fuente de la fracción orgánica sobre los demás residuos que se pueden generar. Los resultados compilados en la gráfica 5, muestran que para el caso del sector comercial el 65% de los generadores no realiza procesos de separación en la fuente, donde se realiza la mezcla de todos los residuos producidos en los recipientes dispuestos para el almacenamiento, mientras que el 35% de los generadores desarrolla separación en la fuente. Aunque la mayor cantidad de residuos producidos en estos puntos corresponde a orgánicos, la no separación en fuente se convierte en una limitante para la inclusión en los procesos de aprovechamiento energético y material objeto de este estudio.

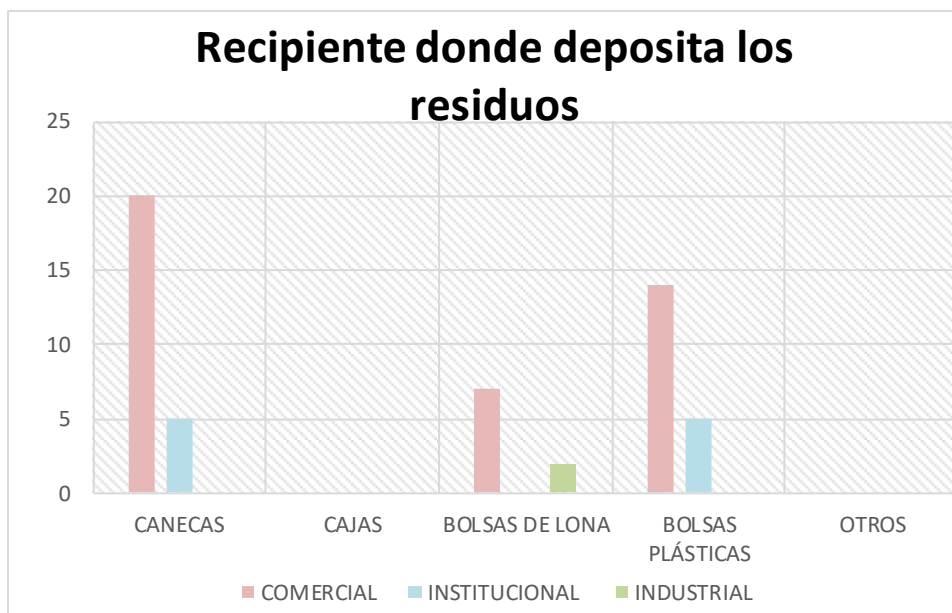
En el sector institucional, en lo que respecta a los jardines infantiles se realizan procesos de separación de residuos en todos los casos, contrario a lo que sucede en las instituciones educativas de básica primaria y secundaria, donde la mayor generación se da por parte del cuerpo estudiantil careciendo de campañas para promover este tipo de procesos. Se evidencia en dos de los cuatro jardines infantiles identificados, que se desarrollan procesos de pesaje y rotulación de los residuos producidos, lo que está relacionado con las exigencias realizadas por las autoridades competentes para este tipo de establecimientos. De acuerdo con la información suministrada por los encargados de los dos establecimientos industriales, se realizan procesos de separación en la fuente para ambos casos, sin embargo, en las visitas realizadas se observa presencia de bolsas plásticas en mezcla con los residuos orgánicos, estas bolsas corresponden al empaque tanto de pulpas producidas o arepas que, al momento de desechar el producto, no se realiza el correspondiente retiro del material de protección.



Gráfica 5. Resultados encuesta sobre realización de procesos de separación en fuente

Se buscó identificar el tipo de recipientes donde se almacenan los residuos hasta ser entregados para su disposición final; los resultados se detallan en la gráfica 6. En su mayoría, los generadores utilizan recipientes plásticos “canecas” para el almacenamiento de los residuos en general y posteriormente bolsas plásticas o bolsas de lona (costales) para ser entregados al recolector. Es de considerar que un generador puede utilizar uno o varios materiales diferentes para el almacenamiento de los residuos, siendo común en este estudio para el caso del sector comercial e institucional.

En los jardines infantiles pertenecientes al sector institucional los residuos orgánicos producidos se almacenan en canecas y posteriormente en bolsas plásticas debidamente rotuladas, evitando en su mayoría el uso de bolsas de lona y/o cajas; en las instituciones educativas se hace en canecas y posteriormente en bolsas plásticas donde se mezclan todos los residuos para ser entregados a la empresa prestadora del servicio de recolección. Para el caso del sector industrial, el almacenamiento se hace en bolsas de lona, lo que se debe en parte a que la materia prima adquirida llega en este tipo de materiales, siendo reutilizados para los procesos de almacenamiento de residuos. El sector comercial al cual están adscritos la mayor cantidad de generadores tiene un mayor uso de canecas plásticas para el almacenamiento, seguido de bolsas plásticas y por último bolsas de lona. Aunque para todos los sectores gran parte de la materia prima utilizada llega almacenada en cajas de cartón, en ninguno se utiliza este material como recipiente de almacenamiento, debido que este material es almacenado para su posterior comercialización como material reciclable o entregado a recuperadores.



Gráfica 6. Resultados encuesta sobre el almacenamiento temporal de los residuos orgánicos

Para conocer el destino que pueden tener los residuos orgánicos generados, se indagó en cada punto sobre su uso posterior a la generación; los resultados mostrados en la gráfica 7 indican que, de los 26 generadores pertenecientes al sector comercial, 25 hacen la entrega de los residuos sólidos orgánicos a la empresa prestadora del servicio de aseo, el punto restante que corresponde al “Supermercado la 80” lo hace al proyecto de habilitación ambiental del Morro de Moravia para su posterior aprovechamiento material. Dentro del sector institucional, en el punto “Buen comienzo Moravia”, se entregan parte de los residuos orgánicos a un tercero, el cual hace un cobro por la recolección y realiza tratamiento y aprovechamiento de estos, la otra parte es entregada a la empresa de aseo; los demás puntos pertenecientes a este sector realizan la entrega de los residuos a la empresa prestadora del servicio de aseo. En el caso del sector industrial, uno de los puntos de generación entrega parte de sus residuos a un tercero, manifestando desconocer el uso que se le da a estos, la otra parte es entregada a la empresa prestadora del servicio de aseo; el otro generador hace su entrega a la empresa de aseo. En ningún caso se manifestó un aprovechamiento económico, material o de otro tipo realizado por los mismos generadores; cuando se lleva a cabo un aprovechamiento, este es realizado por terceros.

En el momento del desarrollo de este estudio, se realizaba en el Morro de Moravia un proceso de aprovechamiento material con los residuos orgánicos generados en el supermercado la 80, sin embargo, no hay procesos que involucren los demás sectores y generadores, por lo que no se ha visto la motivación por parte de estos para desarrollar este tipo de actividades, reflejándose esto en los bajos y casi nulos procesos de aprovechamiento en el barrio.

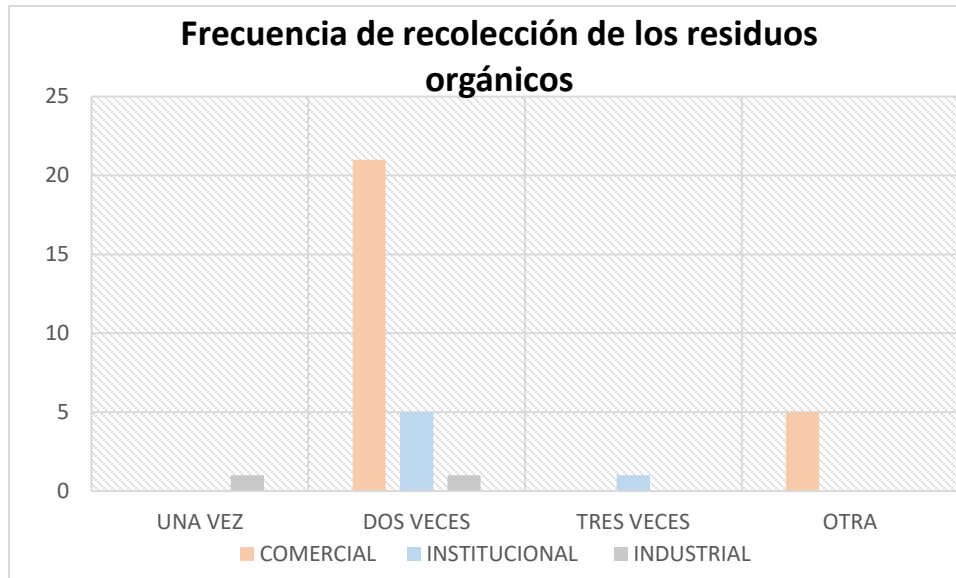


Gráfica 7. Resultados encuesta sobre el uso de los residuos sólidos orgánicos

La recolección de los residuos en el barrio Moravia por parte de la empresa prestadora del servicio de aseo se hace dos veces por semana, correspondiendo a los días lunes y jueves; sin embargo, debido a la cantidad de residuos que se pueden generar en algunos puntos, hay rutas de recolección extras o, en algunos casos son terceros las personas que hacen la recolección. La gráfica 8 recopila los resultados para la frecuencia de recolección en cada punto. En la mayoría de los casos, la frecuencia de recolección corresponde a dos veces por semana, lo cual está ligado a la frecuencia establecida por la empresa prestadora del servicio de aseo que se hace para todos los residuos en general. En uno de los puntos correspondiente al sector institucional la frecuencia de recolección es de tres veces por semana y de acuerdo con información suministrada por la persona encargada, esta puede variar a dos recolecciones dependiendo de la cantidad de residuos generados; en cualquier caso, la recolección se hace por la empresa de aseo.

Para 4 generadores correspondientes al sector comercial y de acuerdo con información suministrada por los encargados, la recolección se realiza diariamente, pues el carro recolector realiza recorridos diarios por algunos puntos del barrio. Para el caso del supermercado la 80, se hace recolección diaria de los residuos orgánicos y se transportan hacia el Morro de Moravia.

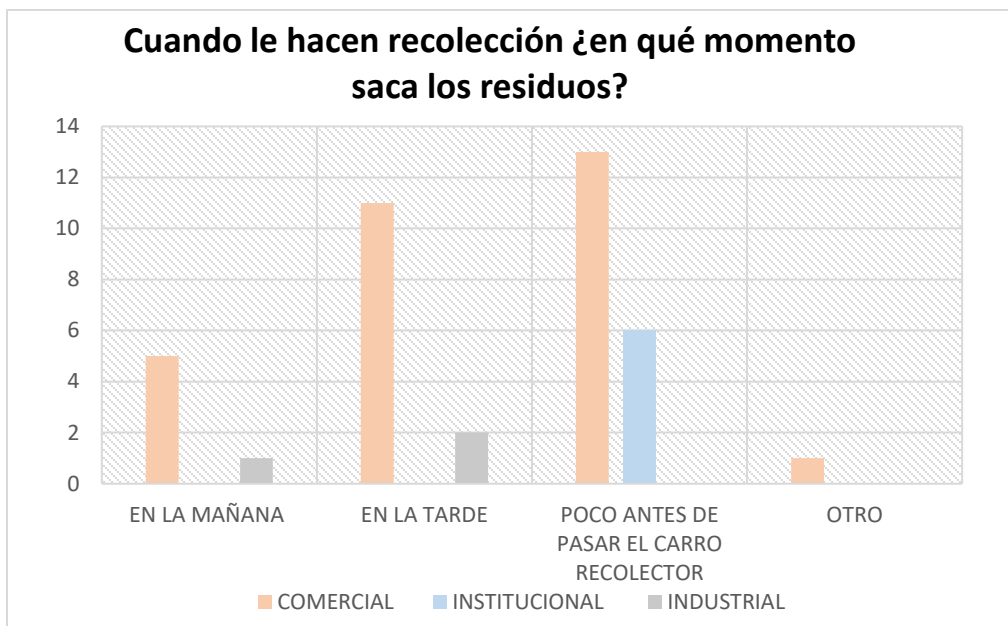
Sólo un establecimiento que pertenece al sector industrial manifestó que la recolección se hace un día por semana, debido que no hay alta producción de residuos y por sus características estos pueden ser almacenados por este periodo de tiempo.



Gráfica 8. Resultados encuesta sobre la frecuencia de recolección de los residuos

Se indagó además sobre el momento en que los generadores disponen los residuos en el punto de almacenamiento temporal previo a la recolección, sea por la empresa prestadora del servicio de aseo o por un tercero. Los resultados presentados en la gráfica 9 indican que la mayoría de los generadores del sector comercial y la totalidad del sector institucional lo hacen poco antes de hacerse la recolección, esto con el fin de evitar la alta acumulación de residuos en los puntos de recolección y el esparcimiento de estos por parte de animales, así como la generación de olores y vectores. Dos de los puntos pertenecientes al sector institucional cuentan con cuarto de almacenamiento temporal de residuos, por lo tanto, la recolección se hace directamente en este punto sin necesidad de llevarlo a una zona dentro del barrio. Se recalca que hay generadores que disponen en diferentes horas el día de recolección, evitando la acumulación de residuos en sus instalaciones y de acuerdo con lo observado, hay disposición diaria en puntos denominados “puntos críticos” independiente del día. Uno de los establecimientos pertenecientes al sector comercial, dispone sus residuos en horas de la noche, previo al día en que se hace recolección por parte de la empresa de aseo.

Otra parte de los generadores lleva a cabo la actividad en horas de la tarde, debido que normalmente el vehículo recolector realiza la ruta en estas horas. Una pequeña parte del sector comercial lo hace en horas de la mañana, quedando el residuo expuesto en el sitio de disposición temporal hasta que sea recolectado por el vehículo y donde se pueden generar problemáticas a raíz del esparcimiento y generación de olores. Por parte de los puntos del sector comercial, institucional e industrial, donde la entrega se hace a terceros, se pacta el horario con la entidad, empresa o persona que realiza la recolección.

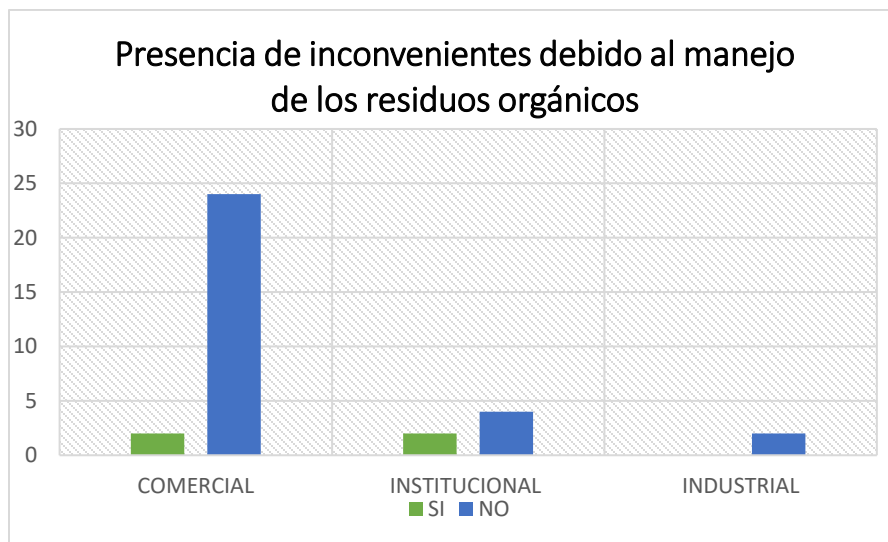


Gráfica 9. Resultados encuesta sobre el momento en que dispone los residuos para recolección

Debido a las problemáticas que se presentan en el barrio por la inadecuada gestión de los residuos, se buscó conocer si los puntos identificados han presentado inconvenientes asociados a la gestión de estos con la comunidad o entidades gubernamentales.

Con base en la información suministrada (gráfica 10), hay una baja presencia de inconvenientes por parte del manejo de residuos orgánicos; sólo dos generadores en el sector comercial manifestaron problemáticas en algún momento con los vecinos debido al esparcimiento de los residuos por parte de animales o con entidades públicas por la conformación de puntos críticos. En el sector institucional, dos establecimientos manifestaron que han presentado inconvenientes por este tema, pero manifiestan de igual manera que han planteado soluciones para ello. Los puntos pertenecientes al sector industrial no manifiestan haber presentado inconvenientes.

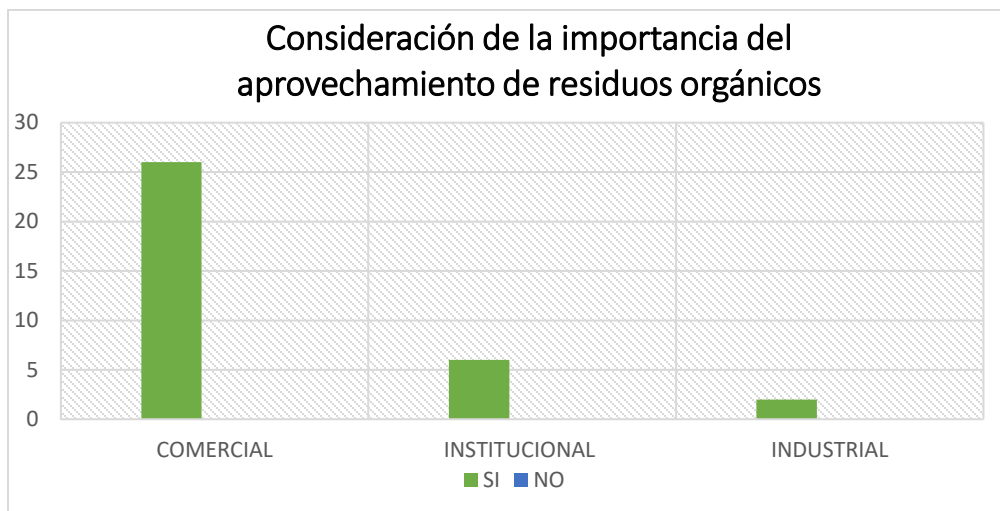
En el desarrollo de las encuestas, algunos establecimientos institucionales presentaron quejas por la disposición inadecuada de residuos sólidos en los sectores aledaños a las aulas de clase, trayendo esto consigo generación de olores y presencia de vectores.



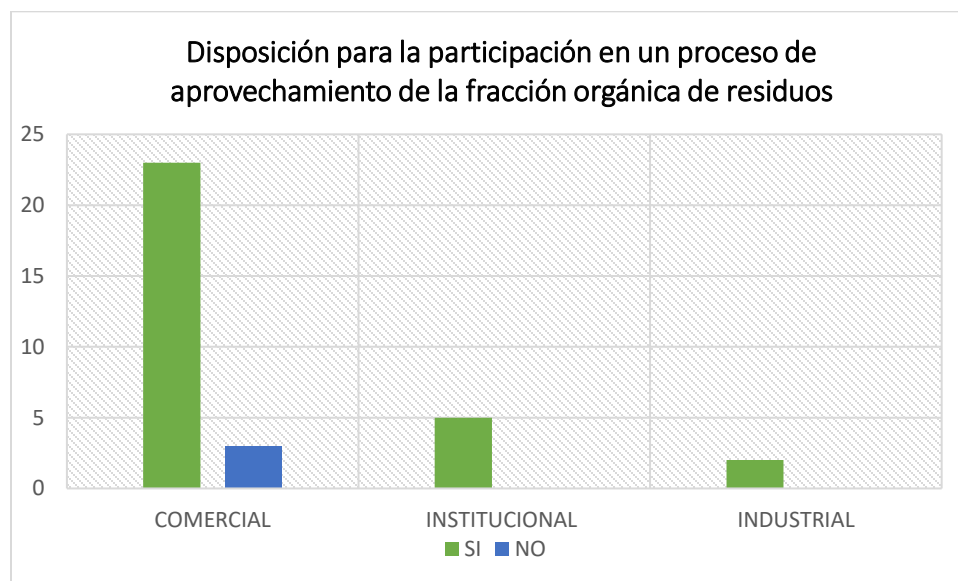
Gráfica 10. Resultados encuesta sobre presencia de inconvenientes por el manejo de los residuos

Finalmente, se buscó conocer la percepción de los generadores sobre la importancia de darle manejo a los residuos orgánicos que generan y la capacidad y disposición de participar en un proceso para el aprovechamiento de estos.

En todos los puntos identificados se considera importante el desarrollo de actividades enmarcadas en la gestión y aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos (gráfica 11), sin embargo no todos los generadores están dispuestos a hacer parte de este tipo de procesos (gráfica 12), donde cuatro de los puntos identificados en el sector comercial no tendrían interés en hacer parte de estos, manifestando poco tiempo para realizar actividades de separación en fuente y la toma y suministro de datos. Se recalca que en su mayoría en los puntos identificados aparte de que consideran de gran importancia el desarrollo de estas iniciativas, estarían dispuestos a hacer parte de un proceso de aprovechamiento de residuos orgánicos en el barrio Moravia.



Gráfica 11. Resultados encuesta sobre la apreciación de los procesos de aprovechamiento de residuos orgánicos



Gráfica 12. Resultados encuesta sobre el interés de participación en un proceso de aprovechamiento de los residuos orgánicos

Selección de generadores para el desarrollo de pruebas de laboratorio y pruebas de campo

Para el desarrollo de las pruebas de laboratorio y pruebas piloto de la implementación del sistema en campo, se realizó la selección de diferentes puntos para cada sector identificado (tabla 8), con los cuales se ha llevado a cabo un proceso en el manejo de los residuos, desde la separación en fuente, aforo, caracterización y recolección de residuos para los posteriores análisis a escala de laboratorio. La selección tuvo en cuenta los puntos de mayor potencial para el proyecto de acuerdo con el tipo y estado del residuo generado, cantidad y frecuencia de generación, separación en la fuente de la fracción orgánica, ubicación y disponibilidad y compromiso para participar en el desarrollo del proceso. Los puntos seleccionados se consideran además como los más representativos de cada sector

tanto en el tipo de residuo orgánico generado como en la cantidad; el aforo y caracterización de residuos se realizó sobre los puntos seleccionados posterior a la aplicación de la encuesta. Aunque en muchos de los puntos no se llevaban a cabo procesos de separación en la fuente, se contó con la disposición inicial por parte de los generadores para poder realizar tal actividad y facilitar el desarrollo de la caracterización, aforo y demás pruebas necesarias.

Se seleccionaron los generadores representativos, que cuenten con servicio continuo y que tengan una ubicación estratégica que permita la recolección y el transporte.

Tabla 11. Puntos seleccionados por sector

Sector	Punto
Comercial	Restaurante donde Charly
	Tienda el Chaco
	Combi Pollo
	Distribuidora de Aguacate
	Bodega de Banano
	Supermercado La 80
Institucional	Pastoral Social Bella Infancia
	Buen Comienzo Mamá Chila
	Centro Infantil Balancines
	Buen Comienzo Moravia
Industrial	Alimentos M&C

En el sector comercial se seleccionaron 6 puntos, de los cuales 4 corresponden a mercados generadores de residuos de restos de frutas, verduras y vegetales frescos y 2 a restaurantes donde se producen residuos vegetales en estado fresco y alimentos sin procesar y cocidos.

Para el sector institucional, se seleccionaron los 4 establecimientos correspondientes a los jardines infantiles, puntos donde hay separación en la fuente.

En el sector industrial se seleccionó el punto correspondiente a la producción de pulpas de frutas, donde se cuenta con alta generación y donde el tipo y características de los residuos que se generan son de interés en el proceso de digestión anaerobia.

5.1.2 Caracterización y aforo de los residuos orgánicos

Como se ha mencionado anteriormente, la caracterización y aforo de los residuos orgánicos se realizó en los puntos seleccionados posterior a la realización de la encuesta.

De acuerdo con los tipos de residuos definidos previamente, se han identificado principalmente en todos los puntos dos categorías: residuos de comida cocida y restos de frutas, verduras y vegetales frescos. En la tabla 12 se muestra por cada punto seleccionado el tipo de residuo que se genera.

Tabla 12. Resultados de la caracterización de residuos sólidos orgánicos en los puntos seleccionados

Sector	Nombre del establecimiento	Tipo de residuos sólidos orgánicos producidos
COMERCIAL	Restaurante donde Charly	Restos de comida cocida, restos de vegetales y frutas frescas. Los residuos provienen de la preparación de alimentos.
	Supermercado La 80	Restos de vegetales, verduras y frutas frescas. Los residuos provienen del rechazo producto de la actividad de comercialización.
	Tienda el chaco	Restos de vegetales, verduras y frutas frescas. Los residuos provienen del rechazo producto de la actividad de comercialización.
	Distribuidora de aguacate	Se presentan principalmente residuos de aguacate producto del rechazo en la comercialización. Se presentan en menor medida frutas en descomposición como zapote, aguacate, mango y banano.
	Distribuidora de banano	Hay presencia de residuos de rechazo a raíz de la comercialización de banano. Los residuos se presentan en mayor medida en estado fresco, con menor producción de residuos en proceso de descomposición.

Sector	Nombre del establecimiento	Tipo de residuos sólidos orgánicos producidos
	Combipollo	Producción principalmente de residuos de cascara de papa y en menor cantidad desperdicios de carne de pollo cruda. Los residuos se producen en la preparación de alimentos.
INSTITUCIONAL	Pastoral social Bella Infancia	Hay producción de residuos de frutas, verduras y vegetales en estado fresco producto de la preparación de alimentos; se producen igualmente residuos de comida cocida producto de sobras en restaurante escolar.
	Buen comienzo "mama chila"	
	Centro infantil Balancines	
INDUSTRIAL	Buen comienzo Moravia	Se generan residuos de frutas en estado fresco producto de la elaboración de pulpas; generalmente se producen residuos de guanábana, piña, mandarina, mango, avena, tomate de árbol, maracuyá y mora.
	M&C alimentos	

Como se describe en la tabla 12, para el sector comercial hay presencia principalmente de residuos de restos de frutas, verduras y vegetales frescos, que se generan en las actividades de comercialización en mercados y en la preparación de alimentos en los restaurantes presentes; en estos últimos también hay producción de residuos de comida cocida que son generados a raíz de las sobras alimenticias. Hay presencia de variedad de productos tanto en estado fresco como en cocido y no se observó una variación significativa en la presencia de estos en el tiempo en que se realizó la actividad.

Para el caso del sector institucional se observa una presencia constante del tipo de residuos sólidos orgánicos en todos los puntos seleccionados. En estos sitios que corresponden a jardines infantiles, se sigue una minuta de alimentación propuesta por el Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), lo cual hace que exista una uniformidad en el tipo de residuos generados. La producción de residuos en estado fresco está asociada

principalmente a la preparación de alimentos. Los residuos cocidos se asocian a las sobras alimenticias.

En el sitio que corresponde al sector industrial hay presencia de residuos como cáscaras, frutas en estado fresco, residuos de fruta y pulpas; se evidenció presencia sólo de residuos frescos y de diferentes tipos de frutas.



Imagen 35. Proceso de caracterización de residuos sólidos orgánicos

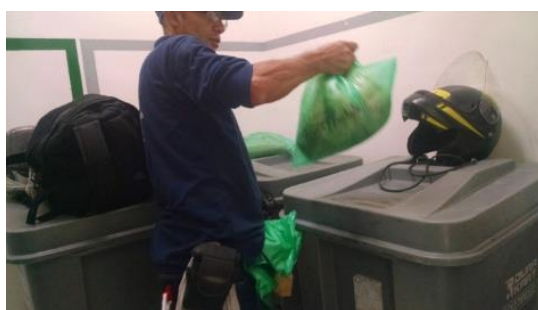


Imagen 36. Proceso de caracterización de residuos sólidos orgánicos



Imagen 37. Proceso de caracterización de residuos sólidos orgánicos

El aforo se hizo tomando el peso total de cada tipo de residuo sólido orgánico producido de acuerdo con las dos categorías encontradas. En la tabla 13, se muestran los resultados del promedio diario de generación en cada punto, detallando el promedio de generación total, el promedio de generación por tipo de residuo de acuerdo con las categorías establecidas y la desviación estándar para cada caso.

Tabla 13. Resultados del aforo de residuos sólidos orgánicos en los puntos seleccionados

Sector	Nombre del establecimiento	Producción de residuos de comida cocida		Producción de residuos de restos de frutas, verduras y vegetales frescos		Producción total residuos sólidos orgánicos	
		Promedio (kg/día)	Desv. Estándar	Promedio (kg/día)	Desv. Estándar	Promedio (kg/día)	Desv. Estándar
COMERCIAL	Restaurante donde Charly	2,30	1,06	4,35	1,40	6,65	2,12
	Supermercado La 80	0,00	0,00	176,60	33,99	176,60	33,99
	Tienda el Chaco	0,00	0,00	19,20	8,77	19,20	8,77
	Distribuidora de Aguacate	0,00	0,00	10,70	6,41	10,70	6,41
	Distribuidora de Banano	0,00	0,00	10,20	4,29	10,20	4,29
	Combipollo	0,00	0,00	39,20	10,08	39,20	10,08
INSTITUCIONAL	Pastoral social Bella Infancia	2,70	0,98	6,80	1,90	9,50	2,75
	Buen Comienzo "Mama Chila"	4,10	1,33	13,30	3,80	17,40	4,79
	Centro Infantil Balancines	4,05	1,52	13,90	6,49	17,95	7,83
	Buen Comienzo Moravia	11,80	2,82	35,30	3,53	47,10	4,31
INDUSTRIAL	M&C Alimentos	0,00	0,00	72,50	20,65	72,50	20,65

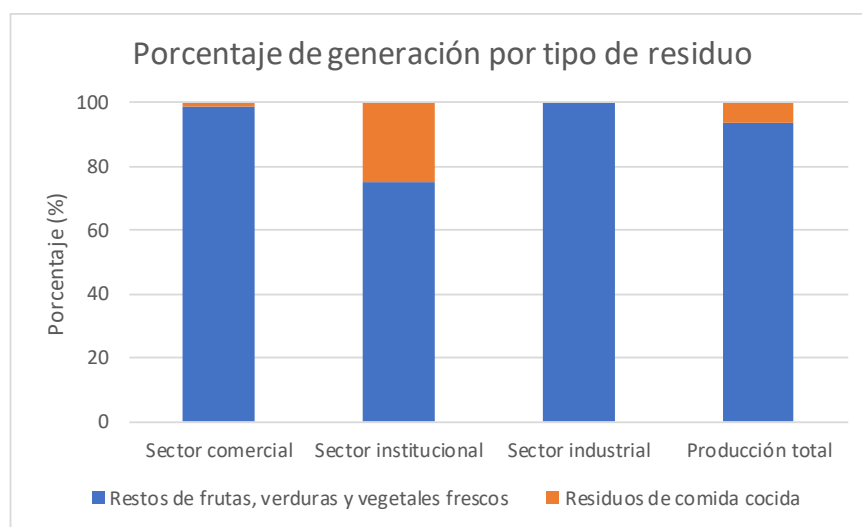


Imagen 38. Proceso de aforo de residuos sólidos orgánicos



Imagen 39. Proceso de aforo de residuos sólidos orgánicos

Con respecto a los resultados de la caracterización y aforo en cada sector y en cada uno de los puntos identificados, en la gráfica 13 se muestra el porcentaje de generación de residuos sólidos orgánicos para las categorías definidas por cada sector.



Gráfica 13. Porcentaje de generación por tipo de residuo sólido orgánico

Para el total de los residuos evaluados la mayor generación corresponde a restos de frutas, verduras y vegetales frescos, estimada en un 94%. En menor medida hay producción de residuos de comida cocida (6%) que son aportados principalmente por el sector institucional, el cual, dentro de su generación el 25% corresponde a este tipo de residuos. En todos los sectores es mayor la generación de restos de frutas, verduras y vegetales frescos, estando distribuida de la siguiente manera: Comercial 99%, Institucional 75% e Industrial 100%. En el sector industrial no se presenta generación de residuos de comida cocida y para el caso del sector comercial esta generación es mínima, representando sólo el 1% del total generado en este sector. Esta distribución en la generación corresponde principalmente al tipo de procesos llevados a cabo, donde los residuos de comida cocida se producen a raíz de las sobras alimenticias en restaurantes escolares y comerciales, siendo mínima su generación en comparación con los restos de frutas, verduras y vegetales frescos.

5.2 Caracterización fisicoquímica de los residuos orgánicos

Caracterización fisicoquímica de las muestras en estado sólido

En la tabla 14 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica realizada a las muestras en estado sólido de los tres sectores. Es de considerar que el tipo de residuo sólido orgánico generado en cada punto puede variar de un día a otro, por lo que la muestra tomada corresponde a la mezcla de los residuos de diferentes días buscando obtener una uniformidad en las características de estos.

Tabla 14. Resultados caracterización fisicoquímica de las muestras en esta sólido

Muestra	Sólidos Totales (%ST)	Sólidos Volátiles (%ST)	Sólidos Fijos (%ST)	Relación SV/ST (%)	Humedad (%)	pH
Sector Comercial	20,70 ± 0,72	18,92 ± 0,90	1,78 ± 0,31	91,40	79,3 ± 0,7	4,47 ± 0,02
Sector Institucional	17,01 ± 0,65	15,15 ± 0,60	1,85 ± 0,14	89,06	83,0 ± 0,7	4,21 ± 0,01
Sector Industrial	24,65 ± 1,34	23,56 ± 1,31	1,09 ± 0,03	95,57	75,4 ± 1,3	3,94 ± 0,01

Los residuos orgánicos del sector comercial, sector institucional y sector industrial presentan un contenido de sólidos totales de 20,70%, 17,01% y 24,65% respectivamente, y aunque provienen de sectores diferentes, el tipo de residuo que se presenta es similar, estando principalmente relacionado con residuos de frutas y vegetales frescos en su mayoría y residuos de comida cocida en menor proporción.

El contenido de sólidos volátiles presentes en los residuos es alto, la relación de SV/ST es de 91,40% para el sector comercial, 89,06% para el sector institucional y 95,57% para el sector industrial, lo que indica que en su mayoría los sólidos de los residuos de cada uno de los sectores corresponden a sólidos volátiles. Aunque hay variabilidad en la relación de SV/ST para los tres sectores, los valores se encuentran en el rango característico para este tipo de residuos y guardan relación de acuerdo con lo reportado por *Camacho et al.* [107], *Nakasima et al.* [108] y *Ballesteros et al.* [109]. Su composición está principalmente constituida por proteínas, almidones, azúcares y grasas, etc., lo que pone en manifiesto que el contenido de sólidos volátiles sea alto [83]. Además, se observa un bajo contenido de sólidos fijos presentes en los residuos, lo que confirma el alto contenido de sólidos volátiles.

Los valores de pH y humedad son característicos de este tipo de residuos y son similares a los reportados por Parra Orobio [13], Li *et al.* [110] y Montes [111]. Los valores de pH están ligados a la rápida acidificación de los residuos, además está asociado al alto contenido de humedad, que causa un aumento en la producción de AGV [13]. El alto porcentaje de humedad se debe principalmente a que la mayor proporción de los residuos orgánicos corresponde a residuos de alimentos crudos, especialmente residuos de

vegetales y frutas; esto favorece el proceso de hidrólisis que corresponde a la fase inicial de la digestión anaerobia [112].

Formulación de mezclas de residuos sólidos orgánicos

Con base en la generación de residuos sólidos orgánicos de los sectores evaluados, se definieron las siguientes mezclas:

- *Mezcla 1 (M1):* Sector Institucional (50%) + Sector Industrial (25%) + Sector Comercial (25%)
- *Mezcla 2 (M2):* Sector Institucional (25%) + Sector Industrial (25%) + Sector Comercial (50%)
- *Mezcla 3 (M3):* Sector Institucional (25%) + Sector Industrial (50%) + Sector Comercial (25%)
- *Mezcla 4:* Sector Institucional (33,3%) + Sector Industrial (33,3%) + Sector Comercial (33,3%)

Caracterización fisicoquímica de las mezclas conformadas en estado sólido

En la tabla 15 se presentan las características de cada una de las mezclas formuladas en estado sólido.

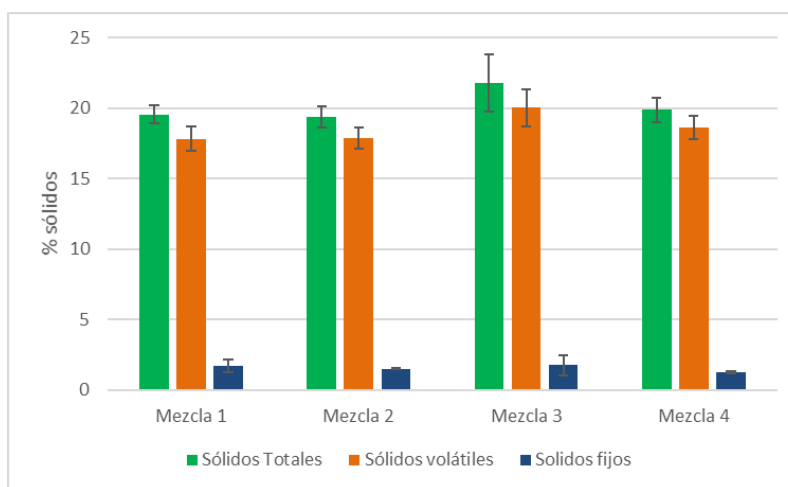
Tabla 15. Resultados caracterización fisicoquímica de las mezclas de residuos sólidos orgánicos

Muestra	Sólidos Totales (% ST)	Sólidos Volátiles (% ST)	Sólidos Fijos (% ST)	Relación SV/ST (%)	Humedad (%)	pH
Mezcla 1	19,55 ± 0,63	17,82 ± 0,88	1,73± 0,44	91,15	80,5 ± 0,6	5,21 ± 0,03
Mezcla 2	19,38 ± 0,74	17,87 ± 0,72	1,51 ± 0,04	92,20	80,6 ± 0,7	5,24 ± 0,02
Mezcla 3	21,78 ± 2,02	20,02 ± 1,33	1,76 ± 0,72	91,91	78,2 ± 2,0	4,94 ± 0,02
Mezcla 4	19,87 ± 0,83	18,63 ± 0,82	1,24± 0,07	93,75	80,1 ± 0,8	4,90 ± 0,02

Se evidencia que al realizar las mezclas de los residuos de los diferentes sectores el contenido de sólidos totales no tiene una alta variación con respecto al contenido de estos en los residuos por separado, caso que es similar para el contenido de sólidos volátiles; tanto los sólidos totales como volátiles tienden a equilibrarse en cada una de las mezclas con respecto a los residuos por separado. Así mismo, se evidencia que la mezcla realizada con base en el contenido de sólidos volátiles que corresponde a una mayor adición de residuos del sector industrial (Mezcla 3), presenta un leve mayor contenido de estos con respecto a las demás mezclas. Al considerar la relación SV/ST se encuentra que los valores son similares a los obtenidos en los residuos por separado y que se encuentran dentro del rango de valores reportados para la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos de acuerdo con investigaciones anteriormente citadas.

Los sólidos fijos presentan similitud entre las diferentes mezclas y las características de los residuos por separado, y corroboran el hecho de que la mayor cantidad de sólidos presentes corresponde a la fracción volátil.

En la gráfica 14 se presentan los resultados para SV, ST y SF de las mezclas realizadas, donde se evidencia la similitud en los valores obtenidos entre estas.



Gráfica 14. Resultados de concentración de SV, ST y SF en las mezclas de residuos sólidos orgánicos

El contenido de humedad no tiene una alta variación entre las mezclas ni con los valores de los residuos por separado, este contenido tiende a equilibrarse en las mezclas y demuestra al igual que lo reportado por otros autores para la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, que la composición principal de este tipo de residuos corresponde a un alto porcentaje de humedad. Machalec *et al.* [113] reportan contenidos de humedad en FORSU entre 60 y 78%; Montes [111] reporta un porcentaje de humedad para residuos orgánicos urbanos entre el 85 y 90%; por su parte Ballesteros *et al.* [109] reportan un 87% de contenido de humedad en residuos de vegetales y frutas.

El pH de las mezclas es mayor al obtenido en los sustratos por separado, lo que puede favorecer los procesos de digestión anaerobia [114], sin embargo, se debe considerar que, para el desarrollo de los PBM, el sustrato a adicionar corresponde al percolado extraído de las mezclas conformadas.

Caracterización fisicoquímica del percolado extraído de las mezclas formuladas

Posterior a la conformación y caracterización fisicoquímica de las mezclas se realizó la extracción del percolado, tal y como se detalla en la metodología. Los resultados de las características del percolado se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados caracterización fisicoquímica del percolado extraído de las mezclas

Muestra	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)	Sólidos Fijos (mg/L)	Relación SV/ST (%)	pH	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación C/N	DQOt (mg/L O ₂)
Percolado Mezcla 1	57.824 ± 1.863	45.461 ± 1.586	12.363 ± 1.159	78,61	4,09 ± 0,01	2,712	0,229	11,843	96.300 ± 2.546
Percolado Mezcla 2	52.897 ± 303	43.164 ± 1.457	9.733 ± 1.155	81,60	4,09 ± 0,02	1,932	0,151	12,795	92.850 ± 5.586
Percolado Mezcla 3	59.135 ± 377	47.887 ± 2.392	11.248 ± 2.584	80,97	4,05 ± 0,01	2,284	0,143	15,972	91.100 ± 1.414
Percolado Mezcla 4	57.307 ± 1.756	47.867 ± 1.667	9.440 ± 89	83,52	4,08 ± 0,01	2,263	0,129	17,543	82.050 ± 1.344

Los sólidos totales presentan características similares en todas las mezclas al igual que los sólidos volátiles. La relación SV/ST obtenida es para la Mezcla 1: 78,61%, Mezcla 2: 81,60%, Mezcla 3: 80,97% y Mezcla 4: 83,52%. Se observa una relación menor de SV/ST del percolado con respecto a las mezclas en estado sólido. Los sólidos fijos ponen en manifiesto que el mayor contenido que se presenta en sólidos corresponde a la fracción volátil. El contenido de sólidos volátiles es comúnmente usado como un indicador la materia orgánica presente, lo que en este caso indica un alto índice de biodegradabilidad [52].

El valor de pH que se obtuvo para el percolado extraído de cada una de las mezclas es ácido y los valores guardan relación entre las mezclas. Estos valores, según la literatura, están asociados a los procesos de hidrólisis-acidogénesis que se dan en las camas de percolación, donde hay actividad de bacterias acidogénicas que consumen el material orgánico y generan ácidos grasos volátiles [23, 115], y guardan relación con los valores reportados por Montes [111], quien obtuvo pH de 4,1 para FORSU y Rincón *et al.* [116], Zhang *et al.* [117] quienes obtuvieron valores de pH entre 3,6 y 4,2 para percolado de residuos orgánicos urbanos; sin embargo, los valores de pH no se encuentran dentro de los rangos propuestos por Zhai *et al.* [118] como óptimos para el desarrollo de la metanogénesis por la población microbiana encargada de esta etapa, que deben estar entre 6,5 y 7,5.

La selección del inóculo resulta ser importante en términos de lograr un adecuado balance del pH, pues este permitirá la capacidad buffer para subir el pH hasta las condiciones óptimas en las mezclas inóculo-sustrato [23]; el inóculo utilizado en este estudio permitió obtener el pH en los rangos óptimos para la digestión anaerobia.

La relación C/N del percolado de las mezclas se encuentra dentro de las reportadas por Zhang *et al.* [119] y Payuelo *et al.* [120] para mezclas de residuos de alimento y lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Caracterización fisicoquímica del inóculo utilizados en las pruebas de PBM

En la tabla 17 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica del inóculo utilizado.

Tabla 17. Resultados caracterización fisicoquímica del inóculo utilizado en el PBM

Muestra	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)	Sólidos Fijos (mg/L)	pH	DQOt (mg/L O ₂)
Inóculo	72.979 ± 2.886	26.819 ± 800	46.160 ± 2.128	7,27 ± 0,01	8240 ± 57

La concentración de sólidos volátiles y la DQO son bajos, indicando un bajo contenido de materia orgánica, lo que se puede deber a la procedencia del inóculo, considerando este como un residuo que ya ha sido degradado.

La relación SV/ST (36,7%) es baja, presentando una mayor proporción de sólidos fijos, lo que es típico de este tipo de lodos [121]. Los valores obtenidos de la caracterización del inóculo son similares a los reportados por Parra Orobio [13] y Julio Guerrero [38] y presenta valores indicativos de una buena capacidad buffer, lo que favorece el proceso de digestión anaerobia [122].

Caracterización fisicoquímica de las mezclas formuladas de PBM

En la tabla 18 se presentan los resultados de la caracterización fisicoquímica de las mezclas formuladas entre el inóculo y el sustrato (percolado extraído de cada una de las mezclas conformadas de los residuos orgánicos).

Tabla 18. Resultados caracterización fisicoquímica de las mezclas formuladas del PBM

Muestra	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)	Sólidos Fijos (mg/L)	Relación SV/ST	pH	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación C/N	DQOt (mg/L O ₂)
PBM Mezcla 1	36.524 ± 556	24.949 ± 504	11.575 ± 266	68,30	7,27 ± 0,03	0,791	0,152	5,203	31.900 ± 1.980
PBM Mezcla 2	31.539 ± 726	17.771 ± 439	13.768 ± 299	56,34	6,68 ± 0,03	0,754	0,154	4,896	29.550 ± 495
PBM Mezcla 3	37.597 ± 366	21.535 ± 233	16.062 ± 134	57,27	6,97 ± 0,04	1,033	0,126	8,198	22.000 ± 1.273
PBM Mezcla 4	33.484 ± 1.432	19.523 ± 655	13.961 ± 785	58,30	6,87 ± 0,02	1,261	0,227	5,555	29.550 ± 1.051

Se evidencia que hay un cambio significativo en las características del percolado al adicionar el inóculo; esto es común para las cuatro mezclas y se debe principalmente a que el inóculo se mezcló con el sustrato en una proporción 3:1 basada en sólidos volátiles; al usar esta relación se garantiza una cantidad adecuada de microorganismos para la

digestión, puesto que grandes volúmenes de inóculo aseguran una alta actividad microbiana, lo que contribuye a la estabilidad del proceso [38].

Se observa una disminución en la relación SV/ST, lo cual puede ser consecuencia de la baja relación SV/ST del inóculo y la relación inóculo sustrato utilizada. Para la Mezcla 1 se pasó de una relación SV/ST de 78,61% a 68,30%, para la mezcla 2 de 81,60% a 56,34%, la mezcla de 3 de 80,97% a 57,27% y para la mezcla 4 de 83,52% a 58,30%; el contenido y porcentaje de sólidos fijos aumentó en todos los casos. En todos los casos las mezclas quedaron en un rango óptimo de SV/ST para la digestión anaerobia.

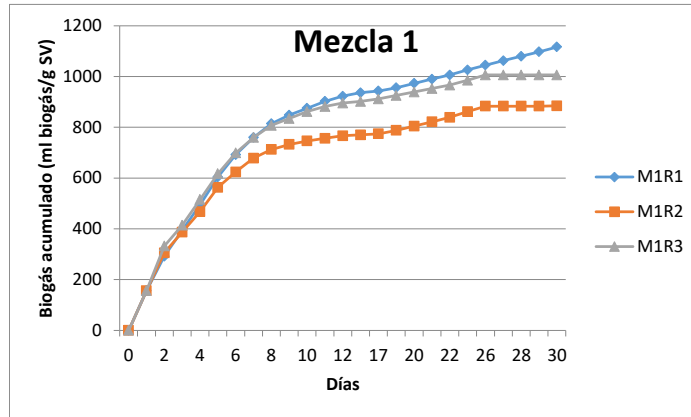
La incorporación del inóculo llevó a que el valor del pH de las mezclas del percolado aumentara hasta valores que son aptos para los procesos de digestión anaerobia, entre 6,5 y 7,5 de acuerdo con lo reportado por Zhai *et al.* [118], quienes además indican que el valor del pH óptimo puede variar de acuerdo con el tipo de sustrato y a la técnica de digestión. Esto además es consecuencia de la relación inóculo sustrato utilizada, el cual cuenta con una alta capacidad tampón.

El carbono disminuyó en las mezclas formuladas con la adición del inóculo, lo cual hizo que la relación C/N de estas disminuyera igualmente; los valores guardan similitud con los reportados por otros autores en ensayos de PBM con residuos de alimento, Julio Guerrero [38], reporta un descenso de las relaciones C/N al mezclar residuos de alimentos y lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales con el inóculo, obteniendo valores entre 4 y 5. La relación C/N puede afectar el proceso de digestión anaerobia, una relación superior a 30 puede generar deficiencia de nutrientes para el crecimiento y reproducción de los microorganismos; mientras que una relación menor a 6 puede inhibir la metanogénesis debido al alto contenido de nitrógeno amoniacal [123, 124], aunque procesos de digestión anaerobia por debajo de los rangos establecidos suelen resultar exitosos [123].

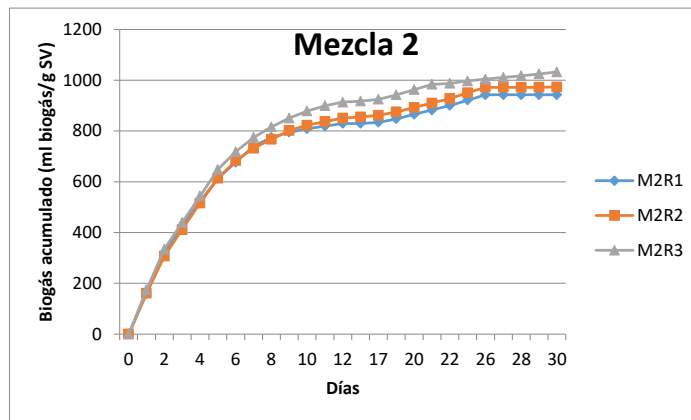
5.3 Potencial Bioquímico Metanogénico – PBM

La prueba tuvo una duración de 30 días, después de este tiempo se observa un decrecimiento en la producción de biogás y el contenido de metano en cada uno de los ensayos. Es importante mencionar que en los ensayos formulados que contenían sólo el inóculo no se registró producción de biogás, por lo que se considera que el biogás que puede generar el inóculo por sí mismo fue extraído en su totalidad previamente; los resultados que se muestran corresponden a la producción de biogás y metano netamente de las mezclas formuladas.

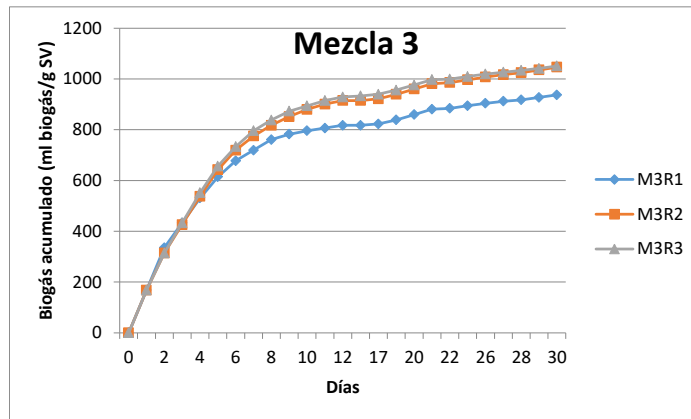
En las gráficas 15 a 18 se muestra la curva de producción de biogás acumulado para cada mezcla formulada, considerando las tres réplicas de cada ensayo. Así mismo, la gráfica 19 muestra el promedio de producción acumulada de biogás para cada mezcla.



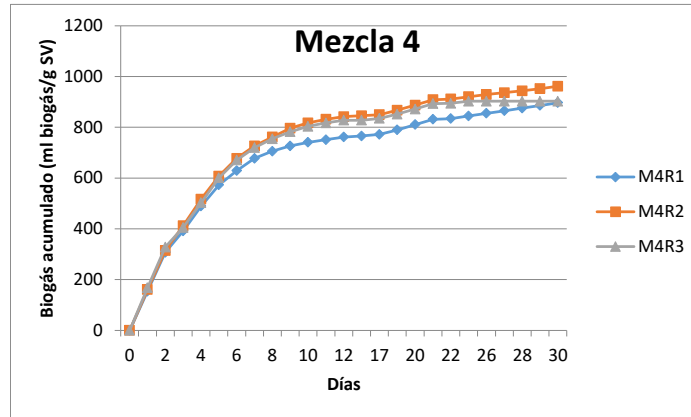
Gráfica 15. Producción de biogás acumulado para la mezcla 1



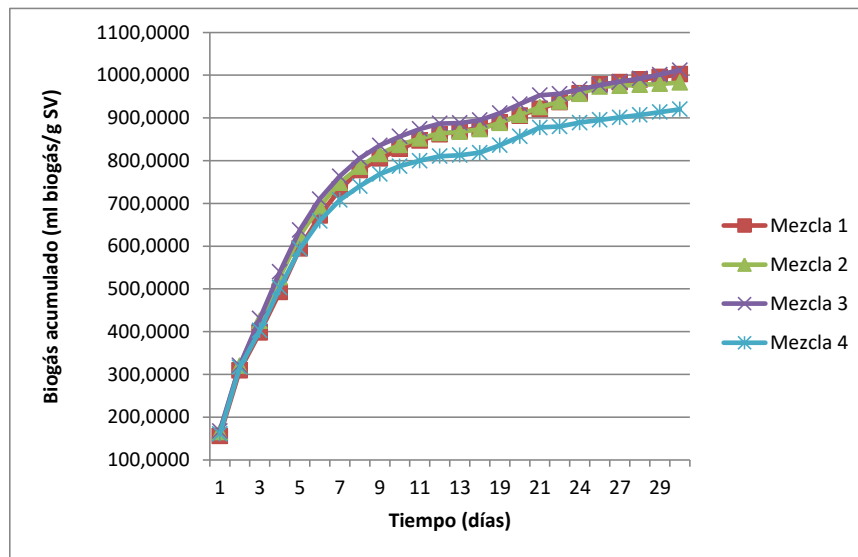
Gráfica 16. Producción de biogás acumulado para la mezcla 2



Gráfica 17. Producción de biogás acumulado para la mezcla 3



Gráfica 18. Producción de biogás acumulado para la mezcla 4



Gráfica 19. Producción de biogás acumulado para las cuatro mezclas

Puede observarse que la cinética de producción de biogás presenta la misma tendencia de crecimiento para todos los ensayos, alcanzando la mayor parte de producción de biogás en los primeros días, lo que guarda relación con una alta biodegradabilidad del sustrato en todos los potenciales desarrollados; esto se relaciona así mismo con la materia orgánica presente en cada una de las mezclas, ya que al ser más fácilmente accesible, es degradada con mayor eficiencia por parte de los microorganismos y por lo tanto una gran parte transformada en biogás [125], indicando igualmente que los sustratos utilizados requieren de tiempos de retención relativamente cortos para ser convertidos en biogás.

Se observa un arranque favorable para la digestión anaerobia en todos los experimentos, donde se evidencia que el comportamiento sigue los mismos patrones para todas las mezclas, con mayor generación de biogás entre el día 1 y 7; posterior a este día empieza a decrecer la producción, lo cual depende de las características de biodegradabilidad de los sustratos utilizados, que hacen que sean degradados en pocos días por los microorganismos [83], conllevando a una fase de estabilización desde el día 8 y siendo más

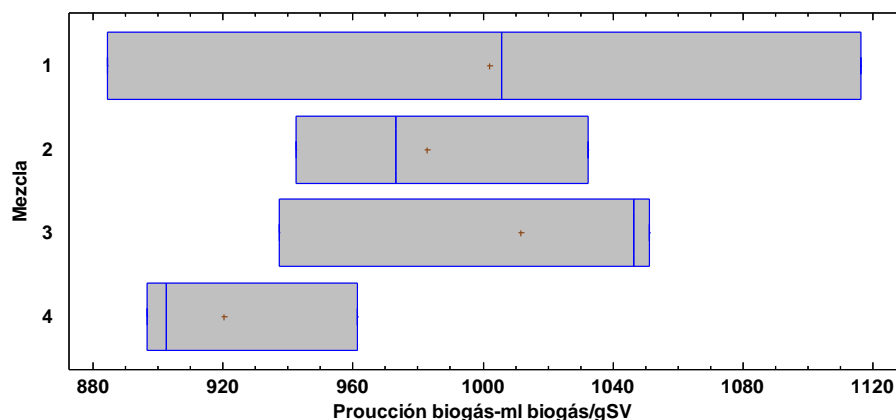
notoria entre los días 12 a 18; seguidamente se observa un leve aumento en la producción de biogás entre los días 19 y 23, y finalmente la producción tiende a estabilizarse hasta el día 30 que corresponde al final del ensayo.

En los primeros 7 días la producción acumulada de biogás alcanzó en promedio para las mezclas 1, 2, 3 y 4 el 73%, 76%, 75% Y 77% respectivamente del total generado en los 30 días de la prueba, siendo el periodo en que mayor producción se obtuvo. Durante los dos primeros días de digestión hubo una mayor degradación de las mezclas, presentándose los picos de mayor generación que equivale para las mezclas 1, 2, 3 y 4 a 31% (309,6 ml biogás/gSV), 33% (320,5 ml biogás/gSV), 32% (321,1 ml biogás/gSV) y 34% (316,5 ml biogás/gSV) del total de la producción acumulada respectivamente. Estos resultados indican y como lo han demostrado otros autores la rápida degradación de los residuos de alimentos, frutas y vegetales [52, 90], lo que se evidencia en la acelerada producción de biogás desde el primer día del ensayo. Esto pone en manifiesto igualmente que el tratamiento previo utilizado para la extracción del percolado puede facilitar los procesos de digestión anaerobia, pues en las camas de percolación implementadas ocurren procesos de hidrólisis y acidogénesis, que corresponde a la primera fase de la digestión anaerobia, y donde empieza la degradación de los compuestos orgánicos por medio de la ruptura de los biopolímeros para generar compuestos más simples, los cuales serán fermentados dando a lugar compuestos precursores, como AGV, alcoholes, y a partir de estos se generara metano en las dos etapas siguientes, acetogénesis y metanogénesis y por ende la producción de biogás, por lo tanto al iniciar los ensayos de potencial metanogénico es evidenciable la alta generación de biogás desde los primeros días del ensayo.

El rendimiento acumulativo fue $1002,2 \pm 116$ ml biogás/g SV, $982,8 \pm 46$ ml biogás/g SV, $1011,5 \pm 64$ ml biogás/g SV y $920,2 \pm 36$ ml biogás/g SV para las mezclas 1, 2, 3 y 4 respectivamente; este rendimiento se calculó como el promedio obtenido de las tres réplicas por mezcla, considerando que las mezclas no son en su totalidad homogéneas y por lo tanto es posible que en cada réplica no se obtenga exactamente la misma mezcla, lo cual se ve reflejado en los diferentes volúmenes de biogás. Aunque el volumen de producción varía de una réplica a otra y así mismo entre las mezclas, los ensayos presentaron una tendencia similar en la producción de volumen de biogás en el tiempo del estudio, lo que se debe a la similitud de las características de los sustratos utilizados y a la rápida adaptación del inóculo con estos. Los volúmenes obtenidos son comparables a los reportados por Sánchez *et al.* [125] para condiciones similares a las de este estudio, reportando para residuos de frutas y verduras una producción de 1260 ml biogás/g SV para una relación inóculo sustrato de 3:1. Fantozzi *et al.* [126] reportan una producción de 750-110 ml biogás/g SV para residuos de plazas de mercado en reactores batch con un tiempo de retención de 30 días; Gerardi [127], reporta que un rango aceptable para la producción de biogás obtenido a partir de digestión anaerobia es de 0,62 a 1,56 m³/Kg SV. Parra Orobio [13] reporta que la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos como los manejados en este estudio contienen un alto contenido de materia orgánica degradable, lo que hace que tengan una alta generación de biogás con un alto contenido de metano.

Las mezclas experimentaron una disminución de la concentración de sólidos volátiles después del proceso de digestión anaerobia que corresponde a 53%, 55%, 51% y 48% para las mezclas 1, 2, 3 y 4 respectivamente durante los 30 días del ensayo. La remoción de sólidos volátiles fue similar para todas las mezclas, lo que se relaciona con la similitud en los valores de producción de biogás, la cual depende fundamentalmente de la cantidad de alimento consumido por las bacterias o, dicho de otra forma, de la cantidad de sustrato eliminado en el proceso; dicho sustrato puede expresarse en términos de sólidos volátiles [109]. Aunque la relación SV/ST del inóculo es baja, la composición fisicoquímica de los sustratos es favorable para la producción de biogás, ya que esta estuvo en todos los casos por encima del control que contenía sólo el inóculo. Los porcentajes de remoción de sólidos volátiles obtenidos están por encima de los valores reportados por Forster *et al.* [128], quienes reportan una reducción de 32,4% de SV durante la digestión anaerobia de residuos de comida en un periodo de 20 días y por debajo de los reportados por Browne *et al.* [129], quienes reportan una degradación de sólidos volátiles de 88% en 25 días. Los valores alcanzados pueden ser comparables con los obtenidos por Mosos *et al.* [90], quienes encontraron una reducción de 48% de SV para residuos de frutas y verduras; Fantozzi *et al.* [126] reportan un 55% de remoción para residuos provenientes de plazas de mercado y finalmente, Pacheco González [52] reporta un 43% de remoción de SV para residuos de alimentos. La diferencia en los porcentajes de remoción depende principalmente de la fuente de inóculo empleada, la relación inóculo sustrato y el tiempo de digestión [130].

Con el fin de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas evaluadas sobre la producción de biogás, se realizó un gráfico de cajas y bigotes (gráfica 20) y se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un nivel de significancia del 5%.



Gráfica 20. Gráfico de cajas y bigotes para la producción de biogás de las cuatro mezclas

En el diagrama de cajas y bigotes realizado para la producción de biogás, los extremos de la caja indican los valores máximos y mínimos de producción de las réplicas por cada mezcla; el punto dentro de la caja representa la media y la línea vertical representa la mediana. Aunque hay diferencias en los valores máximos y mínimos de producción entre las mezclas, el análisis realizado indica que no hay una diferencia significativa en la

producción de biogás ya que las cajas se solapan; esto se corrobora con el análisis de varianza realizado y que se presenta en la tabla 19.

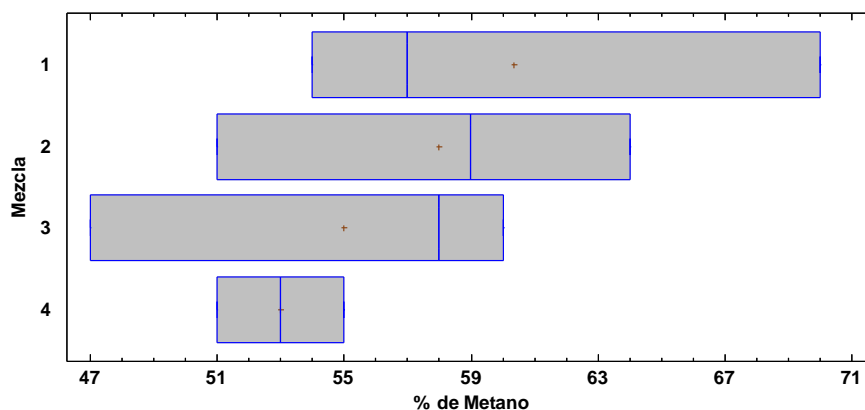
Tabla 19. ANOVA para Producción de biogás por Mezcla

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	15190,6	3	5063,53	0,97	0,4543
Intra grupos	41896,6	8	5237,07		
Total (Corr.)	57087,2	11			

De acuerdo con el ANOVA para la producción de biogás, se obtiene un valor-P de 0,4553, puesto que este valor es mayor a 0,05, indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de producción de biogás entre una mezcla y otra, con un nivel del 95% de confianza. La similitud que existe en la producción de biogás entre las mezclas está ligado a que presentan características fisicoquímicas similares, tanto en los residuos en estado sólido, el percolado extraído y la conformación de mezclas del PBM. A partir del análisis estadístico se infiere que independiente de la mezcla de residuos orgánicos que se utilice es viable la producción de biogás.

Por otro lado, los porcentajes promedio de metano obtenidos en el biogás equivalen a 60%, 58%, 54% y 53% para las mezclas 1, 2, 3 y 4 respectivamente. La relación en los porcentajes de metano está definida por la semejanza en las características fisicoquímicas que se presentan entre estas, siendo además consecuencia del tipo y concentración del sustrato y la relación empleada con el inóculo [31]. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango reportado para el porcentaje de metano de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos como los manejados en este estudio; estudios desarrollados por Castillo *et al.* [131], Chen *et al.* [114] Fantozzi *et al.* [126] Mosos *et al.* [90] y Pacheco González [52], reportan para residuos provenientes de plazas de mercado y restaurantes porcentajes de metano entre 40 y 71%. La concentración de metano en el biogás determina el poder calorífico del mismo y por lo tanto, es un parámetro que permite establecer el uso que se le puede dar al biogás [113]; los residuos utilizados en este estudio son ideales para el tratamiento mediante procesos de digestión anaerobia, teniendo un alto potencial de aprovechamiento, lo que se refleja tanto en la producción de biogás como en el contenido de metano presente en este; considerando además que independientemente de la mezcla utilizada en este estudio, se obtienen altos valores de biogás con un alto porcentaje de metano, por lo tanto, la mezcla no es una limitante para la generación de biogás.

Para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de metano de las mezclas, se realizó un gráfico de cajas y bigotes (gráfica 21) y se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un nivel de significancia del 5%.



Gráfica 21. Gráfico de cajas y bigotes para el porcentaje de metano de las cuatro mezclas

El gráfico de cajas y bigotes para la producción de metano indica que, aunque el porcentaje de metano varía entre una réplica y otra y entre las mezclas, no hay una diferencia significativa entre estas, observándose que las cajas se solapan. Estos valores son corroborados con el análisis de varianza que se presenta en la tabla 20.

Tabla 20. ANOVA para % de Metano por Mezcla

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	94,25	3	31,4167	0,75	0,5541
Intra grupos	336,667	8	42,0833		
Total (Corr.)	430,917	11			

En el resultado de ANOVA para el porcentaje de metano en las mezclas, el valor-P (0,5541) es mayor a 0,05, lo que indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa en la media del porcentaje de metano entre las mezclas, con un nivel del 95% de confianza. Los porcentajes de metano obtenidos se encuentran dentro del rango reportado para los FORSU como se mencionó anteriormente y la baja variabilidad puede estar relacionada con la similitud en las características fisicoquímicas de los sustratos utilizados.

5.4 Implementación del sistema de digestión anaerobia a escala piloto

Con base en los espacios, infraestructura y equipos presentes en el Morro de Moravia y demás adquiridos, se realizó el montaje de un sistema piloto de digestión anaerobia para el aprovechamiento energético y material. En la tabla 21, se detallan los equipos instalados y adecuaciones realizadas para la implementación de este y en las figuras 16 y 17 se muestra el esquema del sistema.

Tabla 21. Lista de equipos y adecuaciones realizadas para la implementación del sistema de digestión anaerobia

Equipo	Marca	Capacidad	Cantidad
Trituradora para residuos orgánicos TR 200	TRAPP	-	1
Báscula de reloj	-	100 kg	1
Tanque de hidrólisis (volumen útil)	Construcción GIEM	0,7 m ³	2
Reactor metanogénico 1 (Volumen útil)	Construcción GIEM	2,81 m ³	1
Reactor metanogénico 2 (Volumen útil)	Construcción GIEM	2,68 m ³	1
Trampa de humedad en pvc	Construcción GIEM	-	1
Filtro en pvc en paralelo para limpieza de sulfuro	Construcción GIEM	-	1
Medidor de gas	Metrex	-	1
Bomba dosificadora 45M5.	Stenner	-	1
Temporizador	General Electric	-	1
Tanque de almacenamiento de efluente	Eduardoño – adaptación	1.5 m ³	1
Bolsa de almacenamiento de biogás en geomembrana	Shemi	12 m ³	1
Tubería y accesorios en pvc de 1" y 2" para la conducción de efluente	Varios	-	Varios
Manguera pe-al-pe de 3/4" y accesorios en bronce de 3/4" para la conducción y almacenamiento de biogás	Varios	-	Varios
Adecuación			
Zona de recepción de material orgánico			10 m ²
Zona de compostaje para la estabilización de la fracción sólida			30 m ²
Caminos para el transporte de los residuos orgánicos			30 metros
Zona de picado y ubicación de reactores de hidrólisis			80 m ²

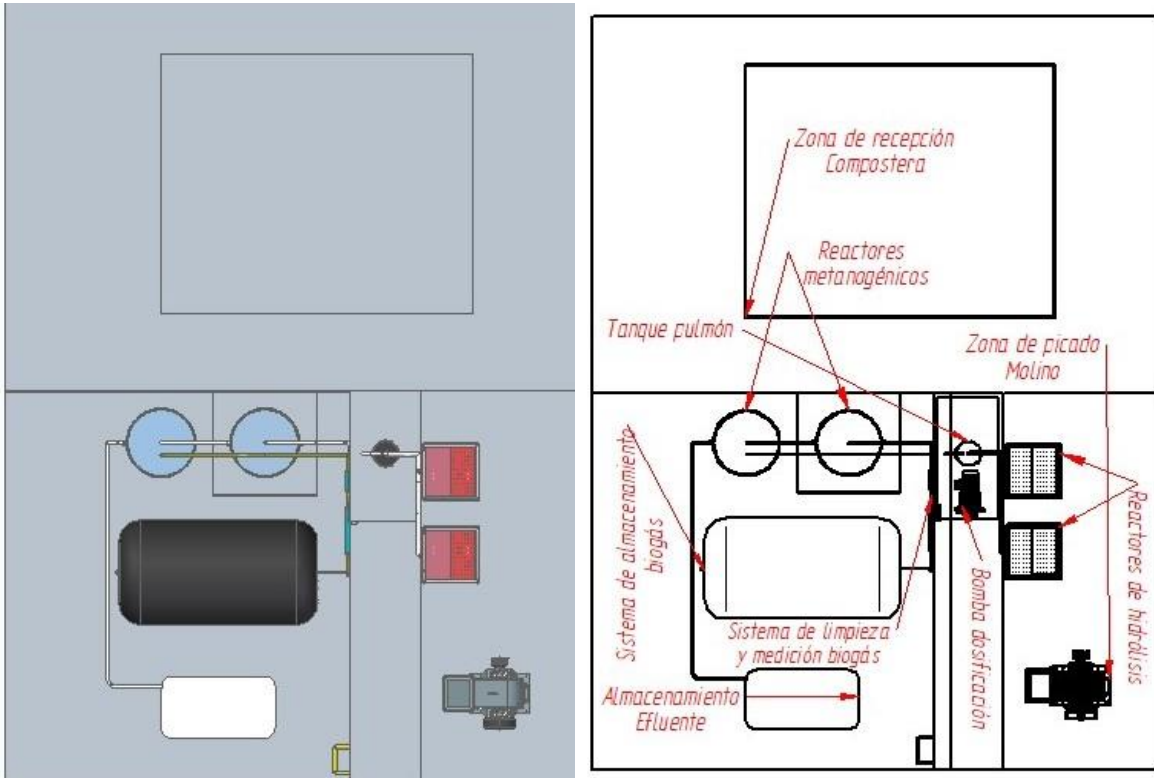


Figura 17. Esquema del sistema de digestión anaerobia instalado – vista en planta

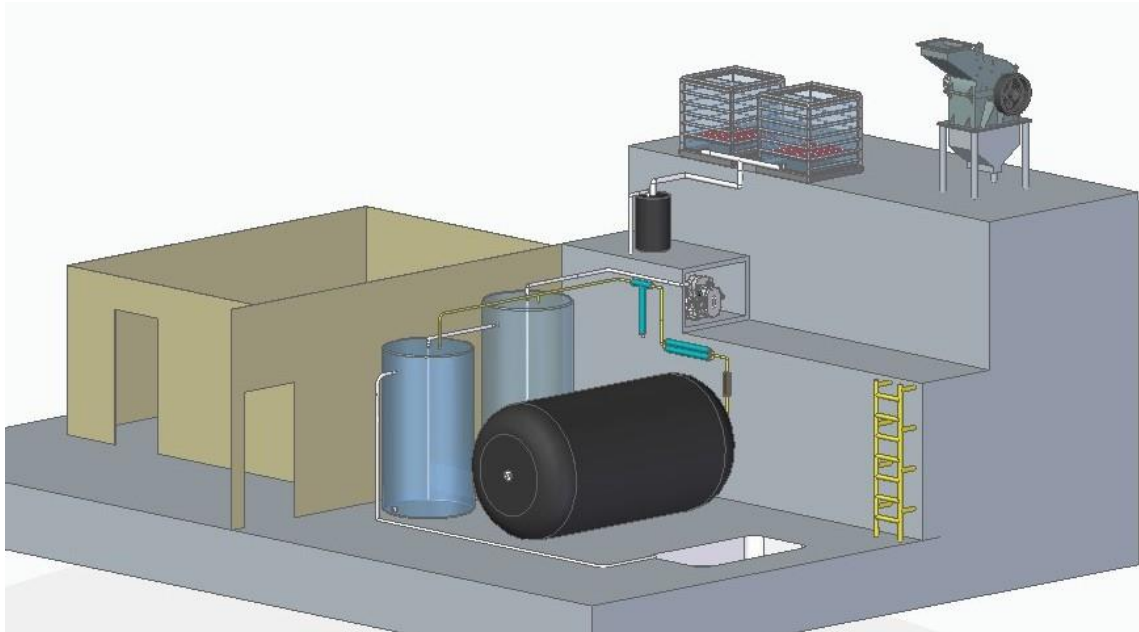


Figura 18. Esquema del sistema de digestión anaerobia instalado

En la imagen 40 se muestra el sistema de digestión anaerobia implementado y la composición de este. Los numerales corresponden a: 1) Reactores de Hidrólisis – RH. 2) Tanque Pulmón - TP. 3) Sistema de bombeo. 4) Reactor Metanogénico 1 – RM1. 5) Reactor

Metanogénico 2 – RM2. 6) Tanque de Almacenamiento de Efluente – TE. 7) Trampa de humedad. 8) Trampa de H₂S. 9) Contador de biogás. 10) Bolsa de almacenamiento de biogás.



Imagen 40. Sistema de digestión anaerobia instalado

5.4.1 Parámetros operacionales

En la tabla 22 se presentan los parámetros de operación máximos que podría alcanzar el sistema partiendo de la capacidad de los equipos adaptados e instalados y considerando un TRH de 25 días.

Por otro lado, en la tabla 23 se presentan las condiciones de operación para el caudal máximo de alimentación (36 l/d) al que se llegó en este estudio, el cual condiciona el TRH que a su vez está condicionado por el volumen de los reactores metanogénicos instalados.

Tabla 22. Parámetros operaciones considerando el TRH

TRH	25 días
Volumen útil	5,49 m ³
Q	0,2196 $\frac{m^3}{día}$
OLR	1,5 $\frac{Kg DQO}{m^3 día}$

Los valores presentes indican que partiendo del volumen disponible en los reactores metanogénicos y considerando un TRH de 25 días de acuerdo con lo reportado por el GIEM, la fase metanogénica está en la capacidad hidráulica de ser alimentada con un caudal de 0,2745 m³/día, lo que depende así mismo de la estabilidad que se presente en esta fase, que podría llegar a limitar la carga de entrada al sistema. La tasa de carga orgánica (OLR) se considera como un parámetro que puede variar de acuerdo con la estabilidad del sistema y a las características del residuo orgánico, que condiciona la alimentación en términos de DQO; para condiciones de operación estables se ha estimado una OLR de 1,5 kg DQO/m³ día.

Tabla 23. Condiciones de operación del sistema bajo el caudal de alimentación en este estudio

Volumen útil	5,49 m ³
Q	0,036 $\frac{m^3}{día}$
TRH	152,5 días
OLR	0,19 $\frac{Kg DQO}{m^3 día}$

La tabla 23 muestra los resultados de operación del sistema de acuerdo con el caudal máximo de alimentación definido en este estudio. Se presentan TRH altos, lo que se debe al bajo caudal de alimentación y al volumen de capacidad que tiene la fase metanogénica, presentando condiciones para un mayor caudal de acuerdo con lo mencionado anteriormente. El caudal definido en esta fase está basado en la disponibilidad diaria de residuos y considerando el proceso de arranque y estabilización del sistema. La velocidad de carga orgánica (OLR) se estima como el promedio durante la fase de operación a un caudal constante de 0,036 m³/día; la OLR presenta bajos valores, lo que está determinado igualmente por el bajo caudal de alimentación y el alto TRH. Se estima que a medida que

el sistema incrementa su operación y su alimentación, la OLR aumente hasta las condiciones que presenten estabilidad en el sistema de acuerdo con los niveles de operación máximos definidos.

Caracterización fisicoquímica del inóculo

El inóculo presentó características típicas de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas, indicando una buena capacidad buffer que logra favorecer la digestión anaerobia [132]. La relación SV/ST que se obtuvo fue de 0.38, siendo un valor bajo desde el punto de la biomasa presente en el lodo, este es un valor típico de lodos de reactores usados para tratar aguas residuales domésticas [133]. El uso de inóculo favorece la fase de arranque en los procesos de digestión anaerobia, además de que acelera la estabilización del sistema.

Tabla 24. Caracterización fisicoquímica del inóculo utilizado los reactores metanogénicos

Muestra	Sólidos Totales (mg/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)	Sólidos Fijos (mg/L)	pH
Inóculo sistema campo	182.772± 11.672	68.731 ± 4.281	114.457 ± 7.391	7,44 ± 0,01

5.4.2 Seguimiento y monitoreo del sistema

El sistema se operó por 200 días; el día 22 de marzo de 2018 se empieza el proceso de picado del material orgánico, alimentación de los RH y puesta en marcha del sistema de bombeo para alimentación de los RM; el monitoreo del sistema se realiza por 180 días a partir del 10 de abril hasta el día 6 de octubre de 2018. La alimentación de la fase líquida en el periodo de arranque que comprende hasta el 24 de mayo de 2018 corresponde a un caudal de 20 L/día; posterior a este día se aumenta el caudal de entrada al sistema a 36 L/día. El sistema es operado a temperatura ambiente que corresponde a un rango mesófilo.

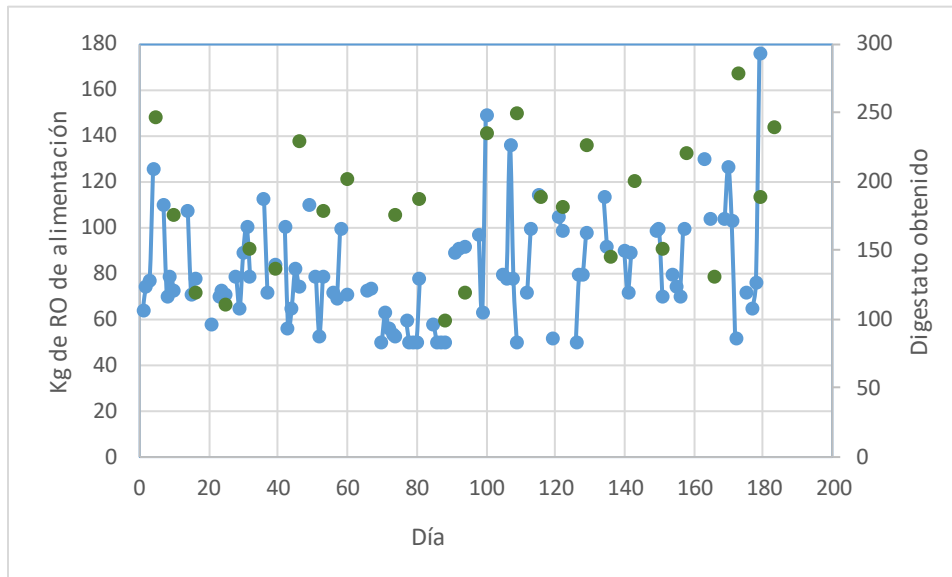
Alimentación de la fase sólida – RH

En la gráfica 22 se muestra la cantidad de residuos orgánicos con que fue alimentado la fase sólida del sistema directamente en los RH (línea azul) y la cantidad de digestato obtenido posterior a la fase de hidrólisis (puntos verdes); los residuos orgánicos con que fue alimentado el sistema fueron previamente sometidos a una reducción de tamaño en la trituradora y de forma manual se depositan en los RH para propiciar la generación de percolado. La cantidad de residuos no es constante y esta varía dependiendo el punto de generación, el día de la semana y el mes; en el sector comercial la fracción orgánica proviene de las actividades de comercialización de verduras, frutas y vegetales, lo que varía de acuerdo con la demanda de los productos, teniendo mayor generación en los días de mercado. La generación en el sector industrial depende de la producción que se tenga, lo que está ligado a la comercialización de los productos, habiendo picos de producción donde hay mayor generación de residuos orgánicos. En el sector institucional la generación varía dependiendo las actividades en los restaurantes escolares, donde se cuenta con vacaciones y días sin actividades. Así mismo, hay variación en la composición de los

residuos generados, y aunque en términos generales los residuos que se producen corresponden a residuos de verduras, vegetales y frutas en estado fresco y en menor proporción residuos orgánicos procesados, la composición de estos puede variar dependiendo del producto procesado y/o comercializado en cada punto.

Inicialmente la recolección de residuos orgánicos se llevó a cabo en los puntos: Supermercado la 80, La tienda de Chaco, Restaurante donde Charly, M&C alimentos, Buen comienzo Moravia, Jardín infantil Balancines, Jardín infantil Pastoral social Bella Infancia, pertenecientes a los sectores comercial, industrial e institucional; a partir del 10 de abril de 2018 por facilidad en la recolección, transporte, separación en la fuente y disposición de los generadores, los residuos fueron recogidos únicamente en el punto comercial: Supermercado la 80 y punto institucional: Jardín Buen Comienzo Moravia; en estos puntos se genera la mayor cantidad de residuos de cada sector. Se considera igualmente que este estudio corresponde a una fase piloto, por lo tanto, la carga de alimentación del sistema es baja en comparación con la capacidad de este, la cual se pretende aumentar en fases posteriores.

Por su parte la cantidad de digestato obtenida posterior a los 7 días de retención de los residuos orgánicos en los RH varía de acuerdo con la cantidad acumulada; esta es retirada y llevada a un proceso de compostaje donde se mezcla con aserrín y se hace un volteo manual dos veces por semana, por un periodo de 60 días para posteriormente obtener un producto estabilizado y con posibilidades de aprovechamiento material.



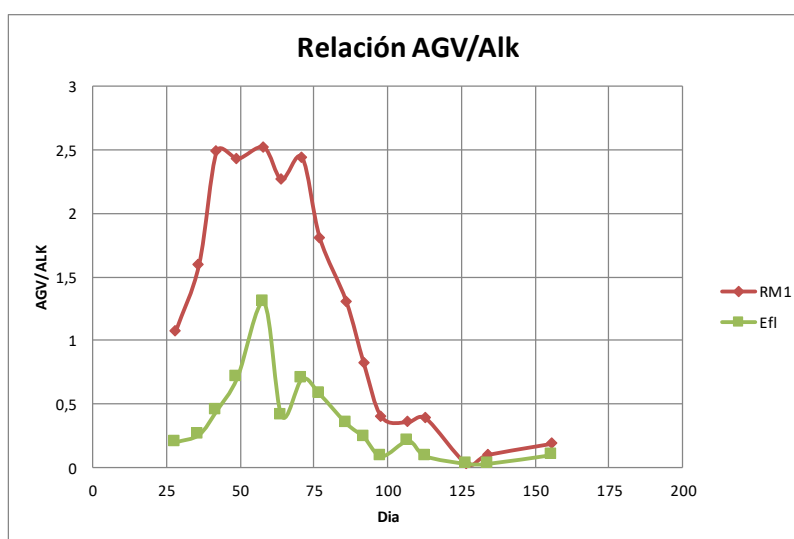
Gráfica 22. Alimentación de residuos orgánicos en la fase sólida y generación de digestato

La relación de percolado producido por kilogramo de residuo orgánico no es lineal, lo que es afectado por diferentes factores como el tipo de residuo, estado del residuo, periodo de degradación, distribución del material dentro del reactor, actividad microbiana, entre otros factores que contribuyen o no a la generación del percolado y que no son posibles de predecir [38]; en este estudio se obtuvo en promedio 0,5 L de percolado/Kg de residuo

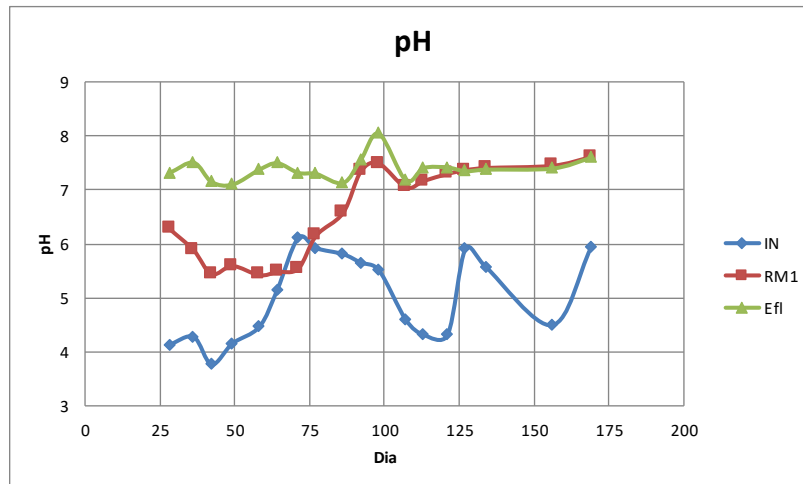
orgánico. Aunque hubo variabilidad en la cantidad de residuos orgánicos con que es alimentada la fase sólida, no se contó con problemas asociados a la disponibilidad de percolado para la operación de la fase líquida; es de considerar que cuando hubo poco aporte de material sólido y por ende poca generación de percolado, se aumentaba el volumen de recirculación de efluente a los RH, buscando mantener el volumen necesario de percolado en el TP para la alimentación de la fase metanogénica. La recirculación se realizó de manera manual, la frecuencia y el volumen de efluente recirculado dependió de la necesidad en la operación del sistema.

Relación AGV/ALK y pH

Los valores de la relación AGV/Alk fueron monitoreados en la fase líquida a la salida del reactor 1 (RM1) y en el efluente que corresponde a la salida del RM2 (Efl), con el fin de conocer el grado de estabilización de ambos reactores y del sistema en general; los resultados se muestran en la gráfica 23. Por su parte, el pH fue monitoreado en el percolado de entrada al sistema proveniente del tanque pulmón (IN), a la salida del reactor 1 (RM1), y en el efluente (Efl); en la gráfica 24 se muestran los valores para el pH en el periodo de monitoreo.



Gráfica 23. Resultados del seguimiento a la Relación AGV/Alk



Gráfica 24. Resultados del seguimiento al pH

Uno de los parámetros de control más importante en los procesos de digestión anaerobia es la relación entre los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad, la cual puede ser usada como una medida del proceso de estabilidad de los biodigestores, indicando la presencia o no de fallos en su funcionamiento; entre más baja sea esta relación, se pueden presentar mejores condiciones de estabilidad en el sistema [134, 135], por el contrario, entre mayor sea la relación, se refleja un balance no apropiado, resultando en condiciones de estrés para el sistema [130, 136]. Diferentes investigaciones han observado que valores de la relación AGV/Alk mayores a 0,5 guardan relación con una inestabilidad en el sistema [137, 138], sin embargo, se ha demostrado que cada sistema es capaz de trabajar bajo sus propios niveles dependiendo de sus condiciones de operación, la capacidad buffer, las características del sustrato y la composición microbiana [130].

En el comportamiento de la relación AGV/Alk se aprecia que los valores al inicio del monitoreo se encuentran por encima de los valores recomendados en la literatura para este tipo de biodigestores, la cual debe estar por debajo de 0,5 [137, 138], esto es común tanto para el RM1 como para el RM2, obteniendo valores mayores en el RM1 debido a que es el reactor donde se recibe el percolado del tanque pulmón, conteniendo valores de pH más bajos y mayor carga orgánica; estos valores guardan relación con la etapa de arranque, donde hay un aumento de la carga orgánica que puede desestabilizar el sistema, generando que la alcalinidad descienda y los ácidos grasos volátiles aumenten [52]. A partir del día 77 empieza a observarse una disminución en los valores de la relación AGV/Alk para ambos reactores hasta su estabilización, lo que indica una adaptación del sistema y que depende además de la recirculación de percolado, la cual se llevó a cabo desde el día 45; a partir de este momento se realiza recirculación del efluente entre 2 y 4 veces por semana de acuerdo con lo recomendado por *Sponza et al.* [139] y *Lai et al.* [140], dependiendo la cantidad de material hidrolizado y la generación de percolado. Para el percolado de salida del RM1 esta relación tiende a estabilizarse con valores menores a 0,5 a partir del día 98 y para el efluente que corresponde a la salida de percolado del RM2, la relación se estabiliza con valores menores a 0,5 a partir del día 86, en ambos casos con valores de pH entre 7 y 7,5, lo que indica una apropiada concentración de alcalinidad que

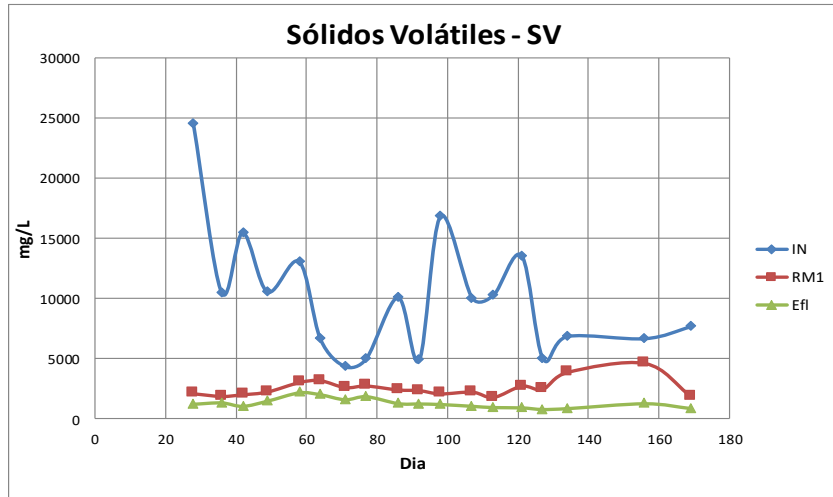
evita la acidificación y mantiene el pH en el rango neutro dentro de los RM que propicia una reducción de la carga orgánica [104]. Estos valores pueden mostrar la estabilización de la etapa metanogénica, siendo indicativos de que no se presentan problemas de inhibición y la posibilidad de procesar más carga orgánica de acuerdo con lo reportado por Caicedo [135]. Como se mencionó anteriormente, estos comportamientos de baja variabilidad en la relación AGV/AIK están dados también por cambios que fueron necesarios en la operación del sistema, como fue la recirculación del efluente para aumentar los valores de pH del percolado de entrada al RM1.

El pH del influente que corresponde al procedente de los reactores de hidrólisis es variable y logra presentar valores bajos que no son aptos para el proceso de digestión anaerobia, los cuales deben estar en el rango de 6,5 a 7,5 [134]. El valor del pH del influente depende de las características de los residuos con que se alimenten los reactores de hidrólisis y por sus bajos valores, con el fin de evitar inhibición del proceso, se tomaron medidas de control como la recirculación del efluente, el cual logra aportar un incremento del pH en el percolado que ingresa al RM1. Se evidencia como a partir del día 45 que se empieza con la recirculación del percolado, los valores de pH aumentan, sin embargo, por fallas en el proceso de operación, se deja de recircular en algunos periodos el percolado, lo que se evidencia en la caída de los valores entre el día 75 y 100 y día 129. Recircular el efluente incrementa el pH y la capacidad buffer del sistema y promueve la mayor degradación de residuos de alimentos [141, 142].

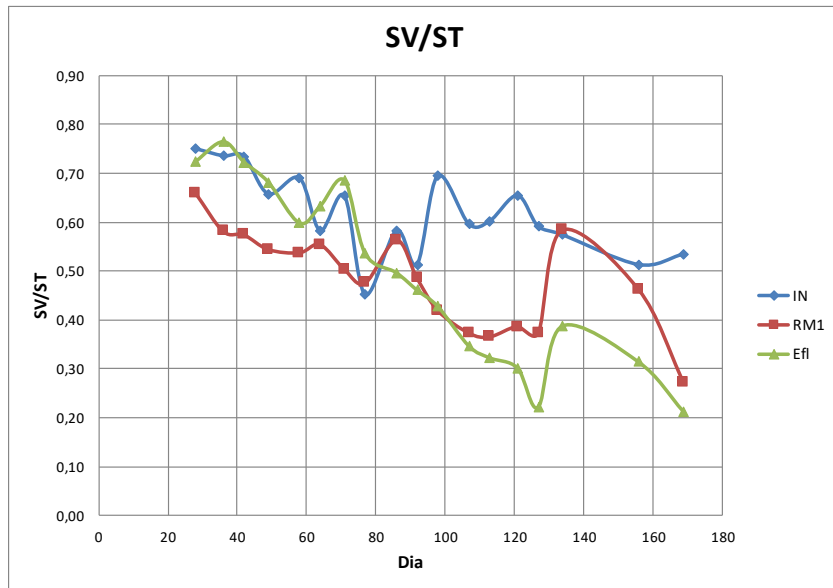
Los valores de pH a la salida del RM1 al inicio del monitoreo están por debajo de los reportados como aptos para que se lleven a cabo los procesos metanogénicos en estos reactores, lo que se relaciona con los altos valores de la relación AGV/Alk. A partir del día 77 se evidencia un aumento en los valores, lo que guarda relación con la estabilización de la relación AGV/Alk; el pH en este reactor se estabiliza a partir del día 98, donde se empieza a observar un comportamiento poco variable, manteniendo un intervalo de pH entre 7,1 y 7,6. El efluente presenta valores de pH aptos de acuerdo con lo reportado en la literatura, evidenciando poca variabilidad entre los valores.

Sólidos volátiles y relación sólidos volátiles/sólidos totales

El monitoreo de los sólidos volátiles y la relación SV/ST se realizó a la salida de reactor de hidrólisis (IN), salida del reactor 1 (RM1), y efluente (Efl). En la gráfica 25 se muestran los valores para los sólidos volátiles y en la gráfica 26 para la relación SV/ST durante el tiempo de monitoreo.



Gráfica 25. Resultados del seguimiento a los sólidos volátiles



Gráfica 26. Resultados del seguimiento a la relación SV/ST

La determinación de los sólidos es importante en la operación de los reactores biológicos ya que, junto con otros parámetros, puede proporcionar información acerca de la carga orgánica y la eficiencia en la producción de biogás [135]. Los sólidos volátiles son usualmente usados como un indicador de la materia orgánica presente, que será la cantidad de alimento disponible para las bacterias y susceptible de generar biogás [143]. Los resultados evidencian variabilidad en la concentración de los sólidos volátiles del influente, que corresponde al percolado procedente de los RH; esta variabilidad puede ser asociada a las características de los residuos con que son alimentados los RH; adicionalmente, la recirculación del efluente hacia los RH afecta la concentración de SV del percolado, por lo cual se puede presentar variabilidad entre los días.

Los valores de SV para la salida del RM1 tienen una baja variabilidad durante el periodo de monitoreo, lo que indica un comportamiento estable del sistema en cuanto a la remoción de materia orgánica. Se evidencia un incremento en la concentración entre los días 109 y 127, lo que puede estar asociado a que en los días previos al muestreo se presentó un problema de taponamiento en la tubería de entrada del percolado al RM1, al destaponar la tubería al interior del reactor hay una agitación, lo que ocasiona que los sólidos que se han sedimentado se disuelvan en el percolado y aumente la concentración. Para el caso del RM 2, se observa igualmente un comportamiento con baja variabilidad en la concentración de los SV y cuyos valores son menores a los del RM1 por ser un sistema en serie, indicando porcentajes de reducción eficientes.

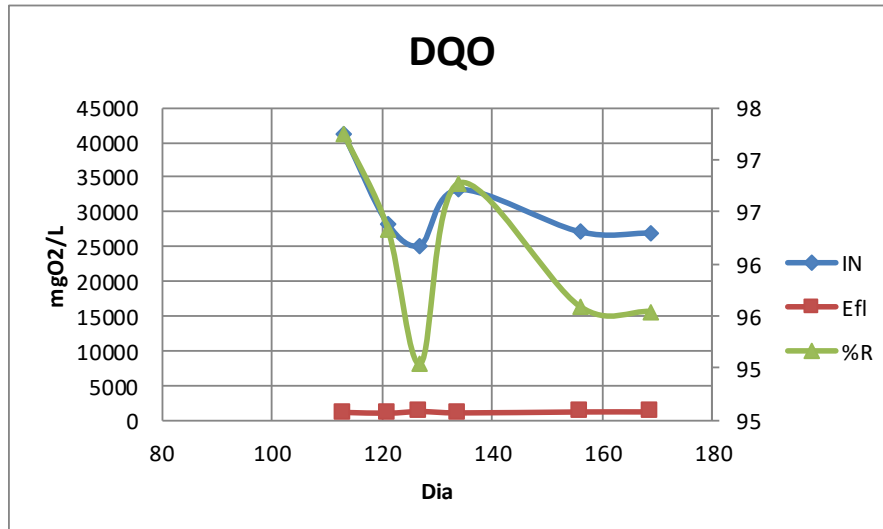
A partir del día 98 se obtuvieron porcentajes de degradación de SV entre el 85% y 90% para todo el sistema con una variabilidad poco marcada sin presentar valores extremos. En el RM1 hay remoción entre el 60% y 70% de los SV con respecto a la concentración de entrada procedente del TP; por su parte en el RM2 la remoción se da entre el 35% y 45% de los SV respecto a la concentración de entrada proveniente del RM1; la mayor remoción de SV se da en el RM1, el cual es el que recibe la mayor carga orgánica y donde empieza la fase de metanización de los compuestos de más fácil degradación.

Los valores de la relación SV/ST ratifican la alta degradación de la materia orgánica, estos valores tienden a ser menores con el tiempo de monitoreo a la salida del RM1 y en el efluente, indicando menor presencia de materia orgánica contenida en el efluente con respecto a los valores del percolado alimentado. De acuerdo con lo reportado por Encarnación *et al.* [144], la estabilización de la materia orgánica se da a partir del día 98, donde la relación entre los SV y ST está por debajo de 0.4, quienes mencionan que, en un sistema de digestión anaerobia, cuando la relación de SV/ST está entre 0,3 y 0,4 puede considerarse como un sistema estable.

Los valores indican una alta biodegradabilidad del sustrato, lo que se relaciona con un buen balance en la relación AGV/Alk por debajo de 0,5 y pH en la fase anaerobia entre 6,5 y 7,5, además indica que el sistema es capaz de soportar la carga orgánica con que es alimentado y pone en manifiesto el hecho de que esta carga orgánica puede aumentar hasta lograr el mayor potencial del sistema. Los porcentajes de reducción de SV guardan relación con lo propuesto por Gopalan *et al.* [115], quienes reportan que los sistemas de dos etapas pueden mejorar la degradación de los SV y recomienda para estos sistemas en condiciones similares a las de este estudio, porcentajes de degradación de SV del 80%; Montes [111] reporta valores máximos de reducción de SV del 91,62%. Una de las ventajas de un sistema de dos etapas es la separación de la fase líquida de la fase sólida, donde el material sólido residual es separado fácilmente de la fase líquida y puede disponerse para procesos de compostaje [31].

Demanda química de oxígeno – DQO

La DQO fue analizada a partir del día 86 ya que se presentaron problemas con los materiales y equipos para su análisis, lo que dificultó obtener resultados previos a este día. En la gráfica 27 se muestran los resultados para este parámetro; la concentración en mgO_2/L se presentan en el costado izquierdo de la gráfica y en el costado derecho se presentan los porcentajes de reducción. Los análisis se realizaron en el percolado de entrada al proceso anaerobio procedente del TP (IN) y a la salida del RM2 (Efl).



Gráfica 27. Resultados del seguimiento a la DQO

La DQO es un parámetro que relaciona la cantidad de materia orgánica presente [43]; este parámetro se evalúa en el influente y efluente, considerando la eficiencia en la remoción de la carga orgánica y estabilidad, que es el resultado de una serie de factores microbiológicos, físicos y químicos que se dan dentro del reactor [31]. Los resultados en el influente muestran variabilidad, que al igual que en los demás parámetros, puede estar relacionada con las características de los residuos orgánicos con que es alimentado el sistema cada día; no es posible observar el efecto de la recirculación del efluente sobre los valores de DQO debido a que el monitoreo de este parámetro se realiza a partir del día 86 y la recirculación empieza desde el día 45. En el efluente se observa una baja variabilidad en los valores de DQO, los cuales están entre 1070 y 1200 mgO_2/L , lo que en comparación con los valores de entrada muestra eficiencia en los procesos de reducción. Se podría suponer el hecho de que se presentó al igual que en los demás parámetros monitoreados, una estabilización en la fase metanogénica, lo que se puede corroborar con la baja variabilidad en los valores del efluente; la relación AGV/Alk tiene una alta influencia sobre la DQO del efluente, indicando que a bajos valores de esta relación se favorecen las condiciones microbiológicas para la oxidación-reducción de la materia orgánica, que logra tener relación con los altos porcentajes de reducción [145]; considerando lo anterior y teniendo en cuenta que la estabilización de la relación AGV/Alk para el RM1 y RM2 se da al día 98 y 86 respectivamente, podría tomar fuerza el hecho de que producto de esta estabilización, se obtienen altos porcentajes de reducción en términos de DQO [31].

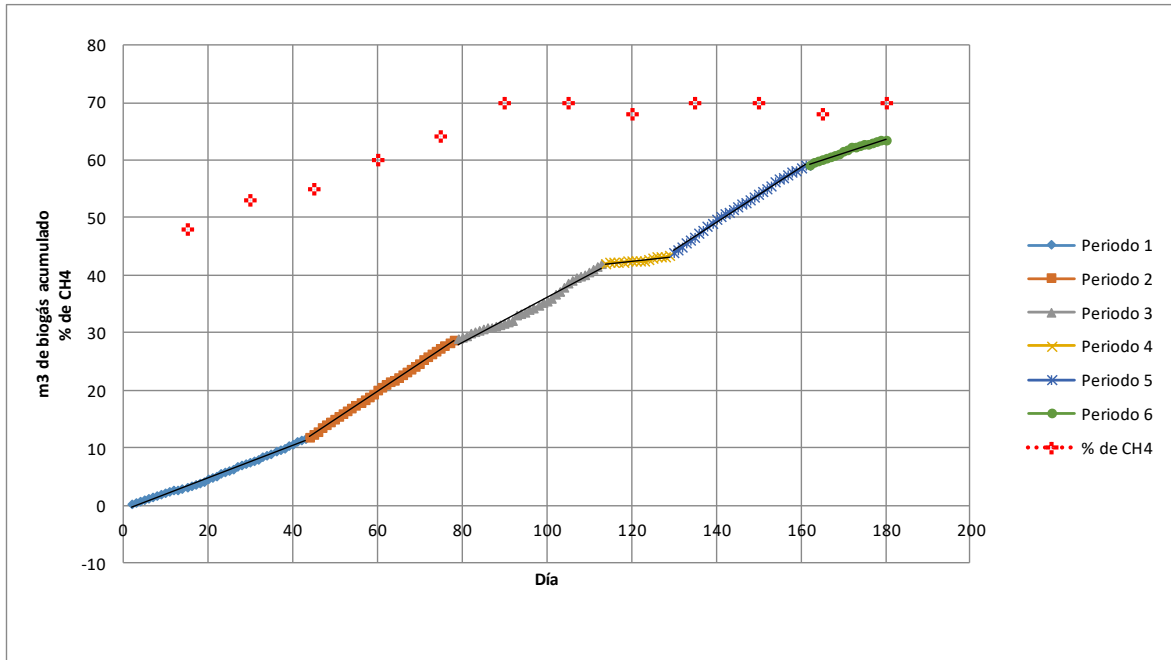
El porcentaje de reducción de la DQO luego de haber pasado por todas las etapas de biodigestión fue significativo, obteniendo valores que en todos los casos fueron superiores al 90%, lo que indica la buena respuesta del sistema y una alta degradación de la materia orgánica favoreciendo la producción de biogás y metano, esto se relaciona así mismo con el alto TRH que propicia un mayor contacto entre el sustrato y los microorganismos [115]. Los porcentajes de reducción coinciden con lo reportado por Caicedo [135], quien obtuvo valores superiores al 80% de reducción; por su parte, Lansing *et al.* [146] reportan reducciones superiores al 90% en procesos de digestión anaerobia, y Moreno *et al.* [92] reportan porcentajes superiores al 95% para digestión anaerobia en dos etapas. Los altos porcentajes de reducción pueden deberse a las características de alta biodegradabilidad del sustrato, su alto contenido de materia orgánica, la adaptación de las bacterias en los RM y el alto TRH [132].

El sistema mostró buena operación en el rango de concentración de materia orgánica bajo el que fue operado, siempre y cuando se encuentre asociado a relaciones AGV/Alk óptimas, cabe señalar que concentraciones altas de DQO tienden a incrementar los valores de la relación AGV/Alk y por lo tanto llevar el sistema a condiciones inestables, por otro lado, bajos valores de DQO reducen el rendimiento del biogás al igual que bajos valores de SV [31]. El hecho de contar con un sistema de dos etapas logra evitar la acumulación de AGV y cuando se recircula el efluente se ayuda a hidrolizar el material de lenta degradación, aumentando la eficiencia la reducción de la DQO [9].

En términos de DQO se podría concluir que el sistema puede ser sometido a condiciones donde se alcance un mayor rendimiento, es de anotar, que el sistema está sobredimensionado y es alimentado con menos carga de la que puede soportar, por lo tanto, es posible y necesario de seguimiento, el aumento en la carga orgánica en el sistema, que permita establecer los rangos de operación en el que se alcance el máximo rendimiento.

Producción de biogás y porcentaje de metano

En la gráfica 28 se muestra la producción de biogás acumulado y el porcentaje de metano durante los 180 de monitoreo al sistema.



Gráfica 28. Producción de biogás acumulado y porcentaje de metano durante el tiempo de monitoreo

La producción de biogás en los procesos de digestión anaerobia conlleva la conversión de la materia orgánica a CH_4 , CO_2 y otros gases bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y pH cercano al neutro en la ausencia de aceptores de electrones exógenos tales como oxígeno, nitrato y sulfato a través complejas interacciones microbianas [138]. De acuerdo con algunas condiciones adversas que se presentaron en el sistema por los procesos de operación y/o el comportamiento de algunos parámetros en la fase de arranque como pH, DQO, SV y relación AGV/Alk, se observa variabilidad en la generación de biogás y el contenido de metano presente en este, con periodos de estabilización condicionados por la operación del sistema.

El seguimiento a la generación de biogás se realizó por un periodo de 180 días, donde se han observado comportamientos variables en periodos de tiempo determinados; en los primeros 43 días (periodo 1) la generación de biogás tiene un comportamiento similar, donde se obtiene en promedio una generación de 273,7 L-Biogás/día, posteriormente entre los días 44 y 78 (periodo 2) hay comportamiento creciente con un promedio de 487,4 L-biogás/día, entre los días 79 a 113 (periodo 3) hay una leve disminución, con un promedio de 379,3 L-Biogás/día; a partir del día 114 al 129 (periodo 4) hay una caída en la generación de biogás, obteniendo un promedio de 101,7 L-biogás/día. Entre los días 130 y 161 (periodo 5) se incrementa nuevamente la generación y se alcanza un valor promedio de 483,3 L-Biogás/día; finalmente, entre los días 162 al 180 (periodo 6) hay un decrecimiento en la generación donde se obtiene un valor promedio de 234,8 L-biogás/día. El rendimiento en términos de generación de biogás tiene un comportamiento variable, y no se logra la estabilización en un valor. En la literatura se reporta que el rendimiento en los procesos de digestión anaerobia tiene un comportamiento creciente durante los primeros días llegando

a un punto en el que se estabiliza [147]; en el periodo de monitoreo no se logró un punto de estabilización, sin embargo, los periodos de mayor generación corresponden al periodo 2 y 5. El hecho de que no se haya logrado una estabilización en términos de generación de biogás puede deberse a las condiciones de operación donde se presentaron algunas anomalías, igualmente a factores como la falta de control de la temperatura con variabilidad durante el día, que puede disminuir la actividad microbiana y limitar el proceso [14, 133].

La mayor generación de biogás se observa en los lapsos de tiempo denominados como periodo 2 y periodo 5, correspondiendo estos a los días en que puede considerarse que el sistema tuvo el mayor rendimiento en términos de generación de biogás; el periodo 1 corresponde a la fase de arranque del sistema, donde se presenta variabilidad en parámetros de importancia como pH, SV y relación AGV/Alk, lo que puede influir directamente sobre la generación de biogás, esta fase es comúnmente considerada como la fase más inestable y crítica de la digestión anaerobia [148] y la producción de biogás no debería considerarse para establecer los rendimientos del sistema, ya que esta fase es un periodo de adaptación [31]. En el periodo 3 se tuvo problemas hidráulicos en el RM1 lo que evitó que el percolado pudiera pasar al RM2, además de fugas en el sistema, por lo cual se evidencia una disminución en la generación de biogás. El día 113 se realizó una adecuación en el sistema de lavado de H₂S, donde se instaló previo a la trampa un filtro para aumentar la eficiencia en la purificación del biogás, este filtro se colmató rápidamente, lo que ocasionó fugas en el sistema y el notable decrecimiento en el registro de la generación de biogás que se muestra el periodo 4.

En cuanto al contenido de metano en el biogás se observa un comportamiento creciente en este, lo que guarda relación con la estabilización del sistema. Al inicio del monitoreo se contó con un porcentaje de metano del 48% el cual fue creciendo hasta valores del 70%; a partir del día 90 y hasta el día 180 que corresponde al final del monitoreo, se observa poca variabilidad en el porcentaje de metano del biogás con valores que oscilan entre 68 y 70%, indicando una exitosa adaptación de los microorganismos y además que es adecuado para ser aprovechado [92]. Estos porcentajes corroboran el hecho de que hubo desarrollo de bacterias metanogénicas y culminación de la actividad hidrolítica [14] y aunque hubo variaciones en las condiciones de operación y generación de biogás, el porcentaje de metano logró estabilizarse en ciertos rangos de operación. Los porcentajes de metano en el biogás guardan relación con los obtenidos por Tamayo [31], quien reporta para condiciones similares a las de este estudio un 73% de metano en el biogás; Moreno *et al.* [92] reportan valores máximos de metano del 76% en digestión de FORSU en sistemas de dos etapas; el GIEM [104], en digestión anaerobia de FORSU en dos etapas obtuvieron porcentajes de metano en un rango entre 60% y 70%.

Cuando se logró mantener la relación AGV/Alk con valores por debajo de 0,5, el pH entre 7,1 y 7,6 y los porcentajes de reducción en términos de DQO y SV por encima del 85%, se obtienen los máximos porcentajes de metano y se da la estabilización de este. En cuanto a la generación de biogás, aunque los parámetros fisicoquímicos evaluados presenten baja variabilidad y estén en los rangos óptimos para el funcionamiento del sistema, el volumen

de biogás tiene variaciones, lo que puede estar ligado a condiciones en los procesos de operación, donde se presentaron fugas, problemas hidráulicos y colmatación de los filtros de limpieza del H₂S.

Como se mencionó anteriormente, el sistema presentó en términos de generación de biogás su mayor rendimiento en el periodo 2 y 5, sin embargo y considerando la estabilización de la relación AGV/Alk y los altos porcentajes de remoción en términos de DQO, es posible aumentar la carga de alimentación al sistema, con el fin de determinar la máxima capacidad de rendimiento.

Variables de estabilización del sistema

De acuerdo con las condiciones de operación del sistema en este estudio mostradas en la tabla 23, y cuando se presentan condiciones estables, determinadas por un pH en el percolado entre 6,5 y 7,5 en la fase metanogénica y una relación AGV/Alk por debajo de 0,5, se logra obtener los rendimientos que se presentan en la tabla 25.

Tabla 25. Variables de estabilización del sistema

% de degradación de la materia orgánica	>90%
pH efluente	>7
Producción específica	0,089 $\frac{m^3 \text{ biogás día}}{m^3 \text{ de reactor}}$
Rendimiento en términos de metano	300 – 1350 $\frac{L \text{ CH}_4}{Kg \text{ SV}}$
Producción de biogás	$\frac{7,5 – 8,5 \text{ L biogás}}{Kg \text{ material orgánico}}$
Porcentaje de metano	68 – 70%

El rendimiento de producción de metano oscila entre 300 – 1350 L CH₄/kg SV, con valores promedio de 950 L CH₄/kg SV; en la literatura se reportan diferentes rendimientos que varían de acuerdo con el tipo de sustrato, composición del sistema y variables de operación. Cho *et al.* [149] reportan para residuos de comida un rendimiento de 230 – 314 L CH₄/kg SV, Che *et al.* [114] obtuvieron valores entre 250 – 970 L CH₄/kg SV para residuos de comida, Bouallagui *et al.* [62] para residuos de comida reportan rendimientos entre 493 –

640 L CH₄/kg SV, Fernández *et al.* [150] obtuvieron 560 L CH₄/kg SV para residuos de plazas de mercado, Sitorus *et al.* [151] reportan 595 L CH₄/kg SV para restos de frutas y vegetales, Cabbai *et al.* [83] obtuvieron para residuos orgánicos municipales valores entre 99 – 571 L CH₄/kg SV.

Por otro lado, la producción de biogás por kg de material orgánico adicionado en estado sólido a los RH oscila entre 7,5 y 8,5 litros; estos valores son bajos si se tiene en cuenta la producción de biogás obtenida en el sistema de digestión anaerobia implementado en El Carmen de Viboral, la cual está entre 35 – 40 L/kg de material orgánico [25]; en este sistema se cuenta con una OLR de 3 kg DQO/m³ reactor y una producción específica de 0,8 m³ de biogás/m³ de reactor [152], contando con una mayor carga orgánica de alimentación y un TRH óptimo de acuerdo con los caudales con que se alimenta el sistema, lo que se ve reflejado en mayores tasas de producción de biogás. Como se ha mencionado anteriormente, se espera que aumente la tasa de producción de biogás conforme aumente la carga orgánica con que es alimentado el sistema y se llegue a la estabilidad de este.

5.5 Coproductos obtenidos en el proceso de digestión anaerobia

5.5.1 Aprovechamiento energético del biogás

El potencial de aprovechamiento se ha determinado con un poder calorífico (Cp) de 8000 kcal/m³ para un biogás con 70% de metano de acuerdo con estudios realizados por el GIEM [153]. En la tabla 26 se presentan los valores de conversión a unidades BTU y kw. Por su parte, en la tabla 27 y 28 se presentan los valores calculados para el potencial de aprovechamiento calórico y eléctrico para diferentes equipos; se muestra el consumo reportado en la literatura para cada equipo y el consumo en m³ biogás/hora con base en el Cp del biogás. Para el cálculo de aprovechamiento eléctrico se tuvo en cuenta la eficiencia de conversión a un equipo de combustión de última generación donde por cada m³ de biogás se obtienen 2.4 kw con una eficiencia de conversión de 25% y a un equipo de combustión sencillo donde se obtienen 1.4 kw por cada m³ de biogás con una eficiencia de conversión de 14,58% [154]

Tabla 26. Valores de referencia energético del biogás

$\frac{kcal}{m^3 \text{ biogás}}$	8000
$\frac{BTU}{m^3 \text{ biogás}}$	31728
$\frac{kw}{m^3 \text{ biogás}}$	9,6

Tabla 27. Cálculo de posibilidades de aprovechamiento calórico

Equipo	Consumo reportado	Consumo en términos de biogás (m³/hora)
Estufa industrial de 8 puestos	64000 BTU/h	2,01
Estufa doméstica	312,5 kcal	0,039
Calentador de agua de 10 litros/min	18 kw	1,87
Lámpara de gas equivalente a 60 W bulbo	1200 kcal/h	0,15

Tabla 28. Cálculo de posibilidades de aprovechamiento eléctrico

Equipo	Consumo reportado	Consumo en términos de biogás motor de última generación (m³/hora)	Consumo en términos de biogás motor sencillo (m³/hora)
Bomba de agua de ½ hp	0.368 kw	0,153	0,263
Cortadora de pasto ¾ hp	0,552 kw	0,230.	0,394
Horno microondas	1 kw	0,417	0,714
Bombillo ahorrador de 25 vatios	0,025kw	0,010	0,017
Bombillo LED	0,009 kw	0,0037	0,0064
Computador de mesa	0,14 kw	0,058	0,1
Computador portátil	0,12 kw	0,05	0,086
Nevera	0,18 kw	0,075	0,129
Olla arrocera	0,6 kw	0,25	0,429

Las características que tiene el biogás obtenido en este estudio (70% de CH₄) hace que presente buenas condiciones para su aprovechamiento energético, sin embargo, la cantidad de generación por día limita un aprovechamiento a mayor escala, lo que puede aumentar a futuro considerando que el sistema logra tener mayor capacidad para el tratamiento de más residuos orgánicos. Se deberán por lo tanto realizar pruebas de rendimiento en equipos para generación de energía eléctrica y aprovechamiento calórico, ya que en este estudio se ha contemplado un aprovechamiento calculado con datos teóricos.

De acuerdo con lo reportado en la literatura, la mayor eficiencia de aprovechamiento se obtiene bajo procesos calóricos, ya que en los procesos eléctricos hay una baja eficiencia de conversión del biogás, por lo tanto, hay una gran cantidad de energía que se desperdicia a diferencia de los calóricos [64].

5.5.2 Caracterización del compostaje

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización realizada al compostaje estabilizado que se obtuvo producto de la mezcla entre el digestato procedente de los RH y aserrín.

Tabla 29. Características fisicoquímicas del compostaje

Parámetro	Resultado	NTC 5167
Calcio total (CaO) (%)	1.154	N.A
Magnesio total (MgO) (%)	0.199	N.A
Potasio total (K ₂ O) (%)	1.82	Reportar si > 1%
Sodio total (%)	0.0710	N.A
Zinc total (%)	0.003	N.A
Cenizas (%)	45.4	Máximo 60%
CIC (meq/100 g)	24.5	Mínimo 30 (meq/100 g)
CIC/CO (Me/100g CO)	127.6	N.A
Carbono orgánico oxidable total (%)	19.2	Mínimo 15%
Conductividad eléctrica (1/200) (dS/m)	0.75	N.A
CRA (%)	162.1	Mínimo su propio peso
Densidad (20°C) (g/cm ³)	0.47	Máximo 0,6 g/cm ³
Fósforo total (P ₂ O ₅) (%)	0.18	Reportar si > 1%
Humedad (%)	16.4	Máximo 30%
Nitrógeno orgánico total (%)	1.25	Reportar si > 1%
pH	8.01	Mayor de 4 y menor de 9
Relación C/N	15.4	N.A
Mesófilos (u.f.c/g)	7,98E+09	N.A
Termófilos (u.f.c/g)	4,0E+06	N.A
Mohos (u.f.c/g)	1,2E+06	N.A
Levaduras (u.f.c/g)	1,4E+06	N.A
Entero bacterias (u.f.c/g)	0,0+00	N.A
Salmonella (u.f.c/g)	Negativo	Ausente en 25 g
Respirometría 24 horas (mg (CO ₂)/g)	0.61	N.A
Material superior a 2 mm (%)	47,2	N.A
Material inferior a 2 mm (%)	52,8	N.A

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana – NTC 5167 en lo relacionado a los requisitos de abonos o fertilizantes orgánicos sólidos, el compostaje obtenido cumple con los requerimientos establecidos para potasio total, cenizas, carbono orgánico oxidable total, capacidad de retención de agua, densidad, humedad, nitrógeno orgánico total, pH y salmonella; la CIC presenta valores por debajo de los recomendados en la norma, lo que se puede deber o indicar que el material no se alcanzó a degradar completamente, pudiendo requerir unos días más para su completa estabilización, ya que bajos valores de la CIC pueden limitar la distribución de los nutrientes sobre el suelo en que pueda ser agregado [155]. Para el caso del fósforo total, la norma establece que se debe reportar para valores mayores al 1%, lo que indica que el valor obtenido fue bajo; este nutriente es esencial para el crecimiento, desarrollo y sostenimiento de las plantas y puede ser formulado con suplementos minerales [31]. Los resultados microbiológicos principalmente

en lo referente a la concentración de entero bacterias y salmonella indican que no hay implicaciones sanitarias para su aplicación [31].

Aunque la norma no tiene un valor establecido para la relación C/N, sí recomienda valores para el porcentaje de nitrógeno (reportar mayor a 1%) y el porcentaje de carbono orgánico oxidable total (mínimo 15%), teniendo como relación ideal mínimo 15. Diferentes autores recomiendan una relación C/N entre 15 y 20, lo que permite una buena actividad microbiana y facilita la absorción de nitrógeno en las plantas [155].

De acuerdo con lo anterior, el compostaje presenta un alto potencial para ser usado como abono orgánico debido a sus características fisicoquímicas y microbiológicas, que garantizan un aporte de materia orgánica, nutrientes, especialmente nitrógeno, potasio y calcio y un producto sin implicaciones sanitarias.

5.5.3 Caracterización del efluente

Las características fisicoquímicas y microbiológicas del influente y efluente se presentan en la tabla 30. Así mismo, se presentan los valores estipulados en la NTC 5167 para la comercialización de fertilizantes orgánico-minerales líquidos.

Tabla 30. Características fisicoquímicas del influente y efluente

Parámetro	Resultado influente	Resultado efluente	NTC 5167
Calcio total (CaO) (g/L)	0.576	0.078	N.A
Magnesio total (MgO) (g/L)	0.49	0.1047	N.A
Potasio total (K ₂ O) (g/L)	4.925	1.487	Mínimo 15 g/L
Sodio total (g/L)	0.41	0.1749	N.A
Zinc total (g/L)	0.00248	<0,01	N.A
Carbono orgánico oxidable total (g/L)	13.8	0.88	Mínimo 20 g/L
Conductividad eléctrica (1/200) (dS/m)	2.17	0.86	Reportar
Densidad (20°C) (g/cm ³)	0.99	1.00	Reportar
Fósforo total (P ₂ O ₅) (g/L)	1.34	0.93	Mínimo 15 g/L
Nitrógeno orgánico total (g/L)	3.08	2.38	Mínimo 15 g/L
pH (10%)	5.17	8.15	Máximo 8,5
Relación C/N	4.50	0.37	N.A
Mesófilos (u.f.c/g)	3,4E+09	2,5E+07	N.A
Termófilos (u.f.c/g)	3,9E+07	8,0E+06	N.A
Mohos (u.f.c/g)	0,0E+00	1,0E+03	N.A
Levaduras (u.f.c/g)	7,6E+03	3,0E+03	N.A
Entero bacterias (u.f.c/g)	0,0+00	1,0+02	N.A

Parámetro	Resultado influyente	Resultado efluente	NTC 5167
Salmonella (25g)	Negativo	Negativo	NA

Considerando los resultados del influente y efluente, se demuestra que el proceso de digestión anaerobia ha conllevado a una reducción en la concentración de Calcio total, Magnesio total, Potasio total, Sodio total, Zinc total, Fósforo total, Carbono orgánico oxidable total y Nitrógeno orgánico total; igualmente, hubo una reducción en la relación C:N. Por otro lado, se nota un incremento en el pH después del proceso. Esto, puede indicar que la digestión anaerobia permite la estabilización del tipo de materia orgánica manejado en este estudio [31].

Teniendo en cuenta lo establecido en la NTC 5167 en lo que respecta a los requisitos fisicoquímicos de abonos o fertilizantes orgánico-minerales líquidos, el efluente no cumple con los valores mínimos requeridos para ser ofrecido como fertilizante con un valor comercial; sin embargo, se pueden realizar ajustes para que cumpla con los parámetros estipulados con el fin de darle un valor agregado a este, convirtiéndose en una excelente alternativa para la formulación de productos básicos orgánicos de uso agrícola con mínima inversión y rápida implementación [104].

Conclusiones

- En el barrio Moravia se presenta una alta actividad comercial, la cual está concentrada principalmente en la zona conocida como el bosque; se logran identificar como potenciales generadores de residuos sólidos orgánicos de este sector, principalmente restaurantes y mercados y tiendas a pequeña escala donde se comercializan frutas, verduras y vegetales. Por otro lado, desde el sector institucional se presentan como potenciales generadores las instituciones educativas y jardines infantiles, principalmente asociado a las actividades en los restaurantes escolares. En menor medida, hay presencia de pequeñas industrias como potenciales generadores de residuos orgánicos, que tienen actividades asociadas al procesamiento de frutas y cereales como la preparación de pulpas y arepas.
- Partiendo de la aplicación de la encuesta, la mayoría de generadores en el sector comercial no realizan procesos de separación en la fuente de los residuos orgánicos, siendo estos entregados a la empresa prestadora del servicio de aseo junto con los demás residuos; a nivel institucional, en su mayoría los jardines buen comienzo, realizan la separación de la fracción orgánica, la cual es entregada a terceros para otros usos al igual que en el sector industrial, donde en todos los casos se realiza separación en la fuente. Es de considerar, que para la implementación de procesos de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, la separación en la fuente constituye uno de los elementos principales, con el fin de evitar que lleguen a los sistemas de aprovechamiento residuos que puedan causar inhibición de los procesos.
- De acuerdo con la caracterización y aforo realizados en los puntos seleccionados, la mayor generación de residuos orgánicos corresponde a restos de frutas, verduras y vegetales en estado fresco (94%); en menor medida se generan residuos de comida cocida (6%) que proviene principalmente de los restaurantes escolares del sector institucional.
- Los residuos orgánicos provenientes de cada sector, así como las mezclas conformadas entre estos y el percolado extraído de ellas, presentan similitud en las características fisicoquímicas, donde se resalta el potencial para su aprovechamiento desde procesos materiales y/o energéticos.
- Las pruebas de PBM muestran tendencias similares en la producción de biogás de las muestras conformadas, obteniendo valores entre $920,2 \pm 36$ ml biogás/g SV y $1011,5 \pm 64$ ml biogás/g SV, con un promedio de metano entre 53% y 60%. Los análisis estadísticos indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre la producción de biogás y el contenido de metano entre una mezcla y otra, con un nivel del 95% de confianza. Estos resultados indican la

viabilidad que tienen los residuos evaluados para la producción de biogás y su posterior aprovechamiento.

- Se logró la adecuación de un sistema de digestión anaerobia en dos fases (sólido – líquido) que fue ubicado en el Morro de basuras de Moravia; este fue construido y ensamblado partiendo de los espacios y equipos disponibles en el sitio y de acuerdo con el modelo desarrollado por el Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares – GIEM de la Universidad de Antioquia.
- De acuerdo con los parámetros de operación del sistema a escala piloto, cuando se llegó a condiciones estables determinadas por un pH en el percolado entre 6,5 y 7,5 en la fase metanogénica y una relación AGV/Alk por debajo de 0,5, se logran obtener porcentajes de degradación de materia orgánica superiores a 90%, pH en el efluente mayor a 7, producción específica de biogás de $0,089 \frac{m^3 \text{ biogás}}{m^3 \text{ de reactor}}$, un rendimiento promedio en términos de metano de $950 \frac{L \text{ CH}_4}{Kg \text{ SV}}$, producción de biogás de 7,5 – 8,5 $\frac{L \text{ biogás}}{Kg \text{ material orgánico}}$, con porcentajes de metano entre el 68% a 70%.
- Partiendo de la capacidad que presenta el sistema y considerando los resultados de los parámetros monitoreados, es posible incrementar la carga de alimentación, acompañado de un monitoreo de las variables con el fin de mantener la estabilidad en este. Se debe considerar que el sistema no fue operado a su máxima capacidad en este estudio, por lo tanto, es importante determinar los parámetros de operación para obtener el máximo rendimiento con base en la capacidad que este presenta.
- Considerando las características del biogás, es posible realizar un aprovechamiento en términos eléctricos y calóricos para suplir necesidades tanto en el Morro de Moravia como en el barrio; sin embargo, la cantidad de biogás generada puede limitar su aprovechamiento dependiendo del destino por el que se opte y el equipo a utilizar. La producción de biogás puede incrementarse con una mayor carga en la alimentación.
- Al someter el digestato a procesos de estabilización mediante técnicas de compostaje, se logró obtener un producto de buena calidad al compararse con la NTC 5167, representando una fuente óptima de aprovechamiento como abono orgánico para las actividades que se llevan a cabo en el Morro de Moravia y en el barrio; así mismo representa un potencial para ser comercializado. Por su parte, ni el influente ni el efluente cumplen con los requisitos para ser comercializado como fertilizante orgánico-mineral líquido de acuerdo con la NTC 5167, sin embargo, pueden realizarse formulaciones para un posterior aprovechamiento.
- Estos procesos son factibles para la correcta gestión y aprovechamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, donde primeramente se disminuyen

las problemáticas asociadas a este tipo de residuos y al mismo tiempo, se logra vincular la comunidad y obtener coproductos que pueden ser aprovechados en entornos urbanos, generando impactos positivos en términos ambientales, sociales y económicos.

- Este tipo de trabajos, donde se logra una vinculación de las entidades estatales, universidades como entes académicos y científicos, sector privado y comunidad, demuestran la factibilidad de implementar sistemas como el manejo en este estudio para el aprovechamiento de residuos, apuntando a la sostenibilidad tanto de los planes de gestión integral de residuos sólidos y de los agroecosistemas en general, obteniendo resultados ambientales, sociales y económicos con impactos positivos.

Recomendaciones

- Es importante incentivar la separación en la fuente de la fracción orgánica de residuos sólidos de los diferentes generadores pertenecientes a los sectores que confluyen en el barrio, con el fin de que estos puedan ser aprovechados mediante los procesos implementados en el Morro de Moravia.
- Se recomienda aumentar la carga de alimentación al sistema paulatinamente hasta obtener su máxima capacidad de operación; esto acompañado de un monitoreo constante de las variables que pueden causar o reflejar una inestabilidad en el sistema.
- Se deberá evaluar técnicamente bajo pruebas en campo los coproductos obtenidos; por un lado, el biogás puede representar una fuente alternativa para suplir las necesidades energéticas que se presentan en el Morro de Moravia y en los sectores aledaños. Así mismo, el compostaje y efluente presentaron buenas características para ser aprovechados como abono orgánico, teniendo un potencial para ser usado en las actividades que se llevan a cabo en el barrio. Estos coproductos pueden ser evaluados igualmente para el desarrollo de procesos de comercialización, con el fin de beneficiar a la comunidad aledaña.
- Es recomendable realizar estudios del impacto ambiental que pueden generar este tipo de propuestas en entornos urbanos, con el fin de determinar tanto los beneficios como las falencias que se pueden generar en términos de impactos negativos; así mismo, desarrollar estudios de factibilidad financiera de su implementación acorde a la normatividad y regulación vigente.
- Este trabajo se convierte en una base para el desarrollo de nuevos procesos que propendan por la aplicación de tecnologías alternativas para el tratamiento de la FORSU en entornos urbanos, ayudando a reducir la cantidad de residuos orgánicos que son llevados a los sitios de disposición final, las problemáticas ambientales

asociadas y los costos de operación, y apuntando a la generación de coproductos que logren beneficiar a las comunidades.

Bibliografía

- [1] K. M. Nazmul, «Municipal solid waste to energy generation: An approach for enhancing climate co-benefits in the urban areas of Bangladesh,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, nº 2, pp. 2472-2486, 2018.
- [2] Q. Aguilar, C. Armijo, P. Taborda y X. Aguilar , «Potencial de recuperación de residuos sólidos domésticos dispuestos en un relleno sanitario,» *Revista de Ingeniería*, pp. 16-27, 2010.
- [3] M. Noguera y J. Olivero, «Los Rellenos Sanitarios En Latinoamérica: Caso Colombiano,» *Rev. Acad. Colomb.Cienc.*, pp. 347-356, 2010.
- [4] L. Acevedo y C. Paláez, «Ciudad postmoderna sumidero de materia y energía - El agujero negro de la biósfera,» *Eolo*, pp. 56-62, 2011.
- [5] L. A. Sepulveda, «Modelo Tecnología para el aprovechamiento de residuos orgánicos biodegradables en complejos residenciales y turísticos,» Medellín, Colombia.
- [6] M. Franchetti, « Economic and environmental analysis of four different configurations of anaerobic digestion for food waste to energy conversion using LCA for: A food service provider case study,» *Journal of Environmental Management*, pp. 42-48, 2013.
- [7] R. Salome, G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo, D. Savastano, «Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of life cycle assessment to process using *Hermetia illucens*,» *Journal of Cleaner Production*, 140, 890-905.
- [8] Y. Van Fan, J. J. Klemeš, C. T. Lee y S. Perry, «Anaerobic digestion of municipal solid waste: Energy and carbon emission footprint,» *Journal of Environmental Management*, vol. 223, pp. 888-897, 2018.
- [9] C. Mao, Y. Feng, X. Wang y G. Ren, «Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, p. 540–555, 2015.
- [10] L. I. Blake, F. A. Halim, C. Gray, R. Mair, D. A. Manning, P. Sallis, H. Hutchinson y N. D. Gray, «Evaluating an anaerobic digestion (AD) feedstock derived from a novel non-source segregated municipal solid waste (MSW) product,» *Waste Management*, vol. 59, pp. 149-159, 2017.
- [11] C. Severiche y R. Acevedo, « Biogás a partir de residuos orgánicos y su apuesta como combustible de segunda generación,» *Ingenium*, pp. 6-15, 2013.

- [12] R. del Valle Zermeño , «Utilización de las escorias de incineración de RSU para el incremento del poder calorífico del biogás generado por digestión anaerobia de la FORSU,» UB - UPC, Barcelona, España, 2013.
- [13] B. A. Parra Orobio, «Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal,» Universidad del Valle, facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR , Cali, Colombia, 2014.
- [14] J. Fernández Rodríguez, «Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura,» Departamento de Ingeniería Química y Tecnología de Alimentos, Universidad de Cádiz, Cádiz, España, 2010.
- [15] Banco Mundial, «Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos,» 2018. [En línea]. Available: www.bancomundial.org.
- [16] Basura Cero Colombia, «Economía Circular & Gestión de Residuos,» Medellín, Colombia, 2018.
- [17] Superservicios, «Superintendencia de servicios públicos domiciliarios,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.superservicios.gov.co>.
- [18] AMVA, «Objetivos y metas estratégicas del PGIRS regional del Valle de Aburrá 2017 - 2030,» Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín, 2017.
- [19] A. Sepúlveda, Interviewee, *Medellín busca recuperar el 25 % de los residuos sólidos*. [Entrevista]. 10 Noviembre 2017.
- [20] A. Vélez y Y. Camargo, «Emisiones De Biogás Producidas En Rellenos Sanitario,» de *Simposio Iberoamericano De Ingeniería De Residuos*, Barranquilla, 2009.
- [21] K. C. Surendra, D. Takara, A. G. Hashimoto y S. Kumar, «Biogas as a sustainable energy spurce for developing countries: Opprtunities and challenges,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 846-859, 2014.
- [22] S. Afzal y S. E. Fleten, «How to proceed with competing alternative energy technologies: A real options analysis,» *Energy Economics*, vol. 30, pp. 817-830, 2010.
- [23] R. Campuzano, «Lixiviación de residuos sólidos orgánicos urbanos para incrementar la rapidez de producción de biogás,» Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F, México, 2015.

- [24] D. Duque y S. Álvarez, «Análisis de prefactibilidad de la construcción de una plantageneradora de energía a partir de desechos orgánicos del Oriente Antioqueño,» Univeridad EAFIT, Medellín, Colombia, 2014.
- [25] K. Rivera Echavarría, «Evaluación de impactos ambientales generados en el aprovechamiento energético y material de la fracción orgánica de los residuos sólidos en el municipio de El Carmen de Viboral Antioquia,» Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2016.
- [26] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Decreto 2981,» República de Colombia, 2013.
- [27] A. Donso, J. Ruiz, Valencia J, P. Torres y B. Parra , «Effect of inoculum on the anaerobic digestion of food waste accounting for the concentration of trace elements,» *Waste management*, pp. 342-349, 2018.
- [28] M. A. Reynoso, «Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos,» Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2017.
- [29] G. Jaramillo y L. Zapata, «Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia,» Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2008.
- [30] L. Lorente, G. Collaguazo, I. Herrera, R. Saraguro, A. Lastre y A. Cordovés, «Diseño de un biodigestor a escala de laboratorio para la digestión anaerobia e industrialización energética de los desechos sólidos municipales,» *Revista DELOS*, vol. 11, nº 31, 2018.
- [31] A. Tamayo, «Recuperación energética de porquinaza y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2014.
- [32] C. T. Lukehurst, P. Frost y T. Al Seadi, «Utilization of digestates from biogas plants as biofertilizer,» *IEA Bioenergy*, 2010.
- [33] L. Walker, Charles W y R. Cord Ruwisch, «Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes,» *Bioresource Technology*, vol. 100, nº 16, pp. 799-807, 2009.
- [34] R. C. Ruiz Bastidas, «Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia,» Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Administración, Palmira, Colombia, 2017.

- [35] D. Blanco Cobián, «Tratamiento biológico aerobio-anaerobio-aerobio de residuos ganaderos para la obtención de biogás y compost,» Universidad de León, León, España, 2011.
- [36] FAO, «Manual de biogás,» Remoción de Barreras para la electrificación rural con energías renovables, Santiago de Chile, Chile, 2011.
- [37] G. Coelho, R. Droste y K. Kennedy, «Evaluation of continuous mesophilic, thermophilic and temperature phased anaerobic digestion of microwaved activated sludge,» *water re search*, pp. 2822-2834, 2011.
- [38] I. C. Julio Guerrero, «Evaluación del potencial de biometanización de la codigestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos,» Universidad de Antioquia, Medellín, 2016.
- [39] CTNCA, «Digestión Anaerobia,» Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación, España, 2013.
- [40] E. Kwietniewska y J. Tys, «Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 491-500, 2014.
- [41] J. L. Ramos, «Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *scenedesmus* sp. procedente de diferentes procesos,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [42] K. Anderson, P. Sallis y S. Uyanik, «Anaerobic treatment process,» *The handbook of wastewater microbiology*, pp. 391-426, 2003.
- [43] L. M. Contreras Velázquez , «Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocera Cubana para la producción de biogás,» Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas , Santa Clara, Cuba, 2013.
- [44] A. Khalid, M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood y L. Dawson, «The anaerobic digestion of solid organic waste,» *Waste Management*, vol. 31, nº 8, p. 1737– 1744, 2011.
- [45] R. Parra, «Digestión Anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,» *Producción + Limpia*, vol. 10, nº 2, pp. 142-159, 2015.
- [46] L. Appels, J. Lauwers y J. Degreève, «Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 4295-4301, 2011.

- [47] B. H. Yan, A. Selvam y J. Wong, «Application of rumen microbes to enhance food waste hydrolysis in acidogenic leach-bed reactors,» *Bioresource Technology*, vol. 168, pp. 64-71, 2014.
- [48] S. Jain, . I. Wolf y J. Lee, «A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 142-154, 2015.
- [49] A. J. Ward, P. J. Hobbs, P. Holliman y D. Jones, «Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources,» *Bioresour. Technol.*, vol. 99, nº 17, p. 7928–7940, 2008.
- [50] B. L. Cueva Ancalla, «Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua,» Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - TACNA , Tacna, Perú, 2012.
- [51] T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl , M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk y R. Jansen, «Biogas Handbook,» Biogas for Eastern Europe, 2008.
- [52] S. I. Pacheco González, «Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2016.
- [53] D. Nguyen, V. Gadhamshetty, S. Nitayavardhana y S. Khanal, «Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review,» *Bioresource Technology*, pp. 513-522, 2015.
- [54] S. E. Arango Osorno, «Evaluación del efecto de la temperatura y la relación de biomasa en la producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos ganaderos y vástago de plátano,» Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2011.
- [55] J. Tupiza y D. Velásquez, «Diseño e implementación de un biodigestor para el funcionamiento de un motor térmico» Universidad Internacional del Ecuador , Quito, Ecuador, 2013.
- [56] G. D. Zupancic y V. Grilic, « Anaerobic treatment and biogas production from organic waste, Management of organic waste,» Sunil Khanal , Rijeka, Croacia, 2012.
- [57] T. Kraemer y S. Gamble, «Integrating anaerobic digestion with composting,» *BioCycle*, vol. 55, nº 10, pp. 33-36, 2014.
- [58] A. Hendriks y G. Zeeman, «Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass,» *Bioresource Technology*, pp. 10-18, 2009.

- [59] J. Demeyer, S. De Meester y F. Velghe, «The environmental sustainability of anaerobic digestion as a biomass valorization technology,» *Bioresource Technology*, pp. 396-403, 2012.
- [60] M. Takata, K. Fukushima, M. Kawai, N. Nagao y C. Niwa, «The choice of biological waste treatment method for urban areas in Japan—An environmental perspective,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 557-567, 2013.
- [61] C. Li, C. Mörtelmaier, J. Winter y C. Gallert, «Effect of moisture of municipal biowaste on start up and efficiency of meso and thermo dry anaerobic digestion,» *Bioresource Technology*, vol. 168, pp. 23-32, 2014`.
- [62] H. Bouallagui, Y. Touhami, R. Ben Cheikh y M. Hamdi, «Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes,» *Process Biochemistry*, pp. 989-995, 2005.
- [63] F. Ali , N. Rashid y A. Pervez, «Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 627-642, 2015.
- [64] IDAE, «Biomasa: Digestores anaerobios,» Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, España, 2007.
- [65] P. Weiland, «Production and Energetic Use of Biogas from Energy Crops and Wastes in Germany,» *Applied Biochemistry and Biotechnology*, pp. 263-274, 2003.
- [66] H. Shahriari, . M. Warith, M. Hamoda y . K. Kennedy, «Evaluation of single vs. staged mesophilic anaerobic digestion of kitchen waste with and without microwave pretreatment,» *Journal of Environmental Management*, pp. 74-84, 2013.
- [67] J. Rapport, R. Zhang, R. Williams y B. Jenkins, «Anaerobic Digestion technologies for the treatment of Municipal Solid Waste,» *International Journal of Environment and Waste Management* , pp. 100-122, 2012.
- [68] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens y T. Tan, «Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 383-392, 2014.
- [69] S. Hobbs, A. Landis, B. Rittmann, M. Young, P. Parameswaran, « Enhancing anaerobic digestion of food waste through biochemical methane potential assays at different substrate: inoculum ratios,» *Waste management*, 71, 612-617.
- [70] F. A. Shah, Q. Mahmood , N. Rashid, A. Pervez, I. A. Raja y M. . M. Shah, «Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 627-642, 2015.

- [71] F. Raposo, M. A. De la Rubia, V. Fernández y R. Borja, «Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, nº 1, pp. 861-877, 2011.
- [72] A. Tiwary, I. Williams, D. Pant y V. Kishore, «Emerging perspectives on environmental burden minimisation initiatives from anaerobic digestion technologies for community scale biomass valorisation,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 883-901, 2015.
- [73] A. Walter, M. Probst, S. Hinterberger, H. Müller y H. Insam, «Biotic and abiotic dynamics of a high solid-state anaerobic digestion box-type container system,» *Waste Management*, vol. 49, pp. 26-35, 2016.
- [74] W. P. Clarke, «The uptake of anaerobic digestion for the organic fraction of municipal solid waste – Push versus pull factors,» *Bioresource Technology*, vol. 249, pp. 1040-1043, 2018.
- [75] L. De Baere y B. Mattheeuws, «Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe – Status, Experience and Prospects,» 2015.
- [76] J. B. Holm Nielsen, T. Al Seadi y P. Oleskiewicz Popiel, «The future of anaerobic digestion and biogas utilization,» *Bioresource Technology*, vol. 100, p. 5478–5484, 2009.
- [77] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens y T. Tan, «Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 383-392, 2014.
- [78] I. Melts, A. Normak, L. Nurk y K. Heinsoo, «Chemical characteristics of biomass from nature conservation management for methane production,» *Bioresource Technology*, vol. 167, pp. 226-231, 2014.
- [79] F. Xu, Z. Wang y Y. Li, «Predicting the methane yield of lignocellulosic biomass in mesophilic solid-state anaerobic digestion based on feedstock characteristics and process parameters,» *Bioresource Technology*, vol. 173, pp. 168-176, 2014.
- [80] A. Bernstad, L. Malmquist, C. Truedsson y J. la Cour Jansen, «Need for improvements in physical pretreatment of source-separated household food waste,» *Waste Management*, vol. 33, pp. 746-754, 2013.
- [81] T. Al Seadi, N. Owen, H. Hellström y H. Kang, «Source separation of MSW: an overview of the source separation and separate collection of the digestible fraction of household waste, and other similar wastes from municipalities, aimed to be used as feedstock for anaerobic digestion in biogas plants,» *IEA Bioenergy*, 2013.

- [82] R. Campuzano y S. González Martínez, «Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review,» *Waste Management*, vol. 54, pp. 3-12, 2016.
- [83] V. Cabbai, M. Ballico, E. Aneggi y D. Goi, «Bmp tests of source selected OFMSW to evaluate aerobic codigestion with sewage sludge.,» *Waste Management*, 2013.
- [84] I. Angelidaki, X. Chen, J. Cui, P. Kaparaju y L. Ellegaard, «Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactor,» *Water Research*, vol. 40, p. 2621– 2628, 2006.
- [85] I. Cabeza, M. Thomas, A. Vásquez, P. Acevedo y M. Hernández , «Anaerobic co-digestion of organic residues from different productive sectors in Colombia: biomethanation potential assessment,» *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, vol. 49, 2016.
- [86] G. Esposito , L. Frunzo, A. Giordano, F. Liotta, A. Panico y F. Pirozzi, «Anaerobic co-digestion of organic wastes,» *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 11, pp. 325-341, 2012.
- [87] A. Lehtomaki, S. Huttunen, T. M. Lehtinen y J. A. Rintala, «Anaerobic digestion of grass silage in batch leach bed processes for methane production,» *Bioresource Technology*, vol. 99, p. 3267–3278, 2008.
- [88] O. Otero Guerrero, «Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar» Universidad ICESI , Cali, Colombia, 2017.
- [89] L. A. Garcés, J. P. Reyes y P. Gutiérrez, «Producción de Biogás a partir de residuos agrícolas.,» 2014.
- [90] W. Mosos, L. Cadavid y A. Agudelo, «Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de palmira,» *Acta Agronómica*, vol. 61, nº 5, pp. 97-98, 2012.
- [91] L. Cadavid, « Reducing the environmental impact of wastewater screenings and producing valuable by-products through the Application of Anaerobic Technologies,» The University of Leeds, 2012.
- [92] V. Moreno Toro, V. Sánchez Restrepo y K. Rivera Echavarria, «Modelo sostenible de un sistema SEBAC para el aprovechamiento de la FORSU en Envigado,» Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2017.

- [93] S. M. Tauseef, M. Premalatha, T. Abbasi y S. A. Abbasi, «Methane capture from livestock manure,» *Journal of Environmental Management*, vol. 117, pp. 187-207, 2013.
- [94] BioWorks, «Potencial Energético del Biogás y su Aprovechamiento,» *Revista de Innovación y Actualidad en Energías Limpias y Sustentables*, vol. 2, nº 11, 2013.
- [95] J. Marti Herrero, «Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación,» *GTZ-Energía*, vol. 53, 2008.
- [96] S. Evangelisti, P. Lettieri, D. Borrello y R. Clift, «Life cycle assessment of energy from waste via anaerobic digestion: A UK case study,» *Waste Management*, vol. 34, pp. 226-237, 2014.
- [97] A. Muscolo, G. Settineri, T. Papalia, E. Attinà, C. Basile y M. Panuccio, «Anaerobic co-digestion of recalcitrant agricultural wastes: Characterizing of biochemical parameters of digestate and its impacts on soil ecosystem,» *Sci. Total Environ*, vol. 586, pp. 746-752, 2017.
- [98] Alcaldía de Medellín, «Plan Parcial de Mejoramiento Integral del Barrio Moravia Documento Técnico, Tomo I,» Departamento Administrativo de Planeación, Medellín, Colombia, 2018.
- [99] Minvivienda, «Guía de Planeación Estratégica para el Manejo de Residuos Sólidos de Pequeños Municipios en Colombia,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Gu%C3%ADa%20de%20Manejo%20de%20Residuos%202017.pdf>.
- [100] Alcaldía de Medellín, 2017. [En línea]. Available: www.medellin.gov.co.
- [101] Ministerio de Ambiente, Vivienda y y Desarrollo Territorial, «Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico y Ambiental - RAS - Título F,» República de Colombia, 2009.
- [102] A. F. Montoya, «Caracterización de Residuos Sólidos,» *Cuaderno ACTIVA*, nº 4, pp. 67-72, 2012.
- [103] Verein Deutscher Ingenieure, « Fermentation of organic material characterization of substrate, sampling collection of material data, fermentationtests - 4630,» VDI-RICHTLINIEN, 2006.
- [104] GIEM, «Programa de apoyo para el manejo de los residuos orgánicos urbanos del municipio de Támesis orientado a la producción de fertilizantes mineral-orgánicos y a la recuperación energética.,» Medellín, 2016.

- [105] R. Mohedano, F. Tavares y P. Filho, «High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full - scale duckweed ponds,» *Bioresource Technology*, vol. 112, pp. 98-104, 2012.
- [106] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo,» Bogotá, 2011.
- [107] R. Camacho, H. Villada y J. Hoyos, «Evaluación del estiércol de vaca como inóculo en la digestión anaerobia termófila de residuos sólidos urbanos,» *Información Tecnológica*, vol. 28, n° 3, pp. 29-36, 2017.
- [108] M. Nakasima-López, P. Taboada González, Q. Aguilar Virgen y N. Velázquez Limón, «Inoculum Adaptation During Start-up of Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste,» *Información Tecnológica*, vol. 28, n° 1, pp. 199-208, 2017.
- [109] M. Ballesteros, M. d. C. Hernández, I. de la Rosa, M. d. C. Mañón y M. d. C. Carreño, «Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación,» *Rev. Centro Azúcar*, vol. 45, 2018.
- [110] R. Li, S. Chen y X. Li, «Biogas Production From Anaerobic Co-Digestion Of Food Waste With Dairy Manure In A Two-Phase Digestion System,» *Applied Biochemistry And Biotechnology*, vol. 160, n° 2, pp. 643-654, 2010.
- [111] M. E. Montes Carmona, «Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2008.
- [112] G. I. González, E. Rustrían , E. Houbron y A. Zamora, «Impacto De La Tasa De Humedad En La Biodegradación De Los Residuos Sólidos Urbanos De La Ciudad De Veracruz, México,» *Revista Latinoamericana De Recursos Naturales*, vol. 4, n° 3, pp. 336-341, 2008.
- [113] J. Machalec, T. Vicentini, J. Moretton , R. Domingo y J. Ignacio, «Reducción de los residuos sólidos orgánicos por procesos de biodigestión. Experiencia en escala laboratorio,» Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda, Departamento de Ingeniería Química , Buenos Aires, Argentina, 2013.
- [114] X. Chen, R. Romano y R. Zhang, «Anaerobic Digestion Of Food Wastes For Biogas Production,» *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, pp. 67-71, 2010.
- [115] P. Gopalan, P. Jensen y D. Batstone, «Anaerobic digestion of swine effluent: Impact of production stages,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 48, pp. 121 - 129., 2013.

- [116] M. Rincón , L. Rincón , J. Mata y I. Chirinos, «Biodegradability of prepared food waste under mesophilic and thermophilic conditions using a complete mix anaerobic reactor,» *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 24, n° 1, pp. 29-48, 2014.
- [117] C. Zhang, H. Su y T. Tan, «Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid– liquid system,» *Bioresour. Technol*, vol. 145, pp. 10-16, 2013.
- [118] N. Zhai, D. Zhang, G. Yin, X. Yang y Y. Feng, «Effect of initial pH on anaerobic codigestion of kitchen waste and cow manure,» *Waste management*, pp. 126-131, 2015.
- [119] C. Zhang, H. Zu, J. Baeyens y T. Tan, «Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production,» *Renew. Sustain. Energy*, vol. 38, pp. 383-392, 2014.
- [120] B. Puyuelo, S. Ponsá, T. Gea y A. Sánchez, «Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions,» *Chemosphere*, vol. 85, n° 4, pp. 653-659, 2011.
- [121] L. Torres y A. Pérez, «Actividad Metanogénica Específica: Una Herramienta De Control Y Optimización De Sistemas De Tratamiento Anaerobio De Aguas Residuales,» *Revista Eidenar*, vol. 9, pp. 5-14, 2010.
- [122] G. Pesta, «Anaerobic Digestion Of Organic Residues And Wastes New York,» *Springer Us*, pp. 53-71, 2007.
- [123] G. Ohandja, N. Voulvoulis y E. Lacodivou, «Food waste co-digestion with sewage sludge – Realising its potential in the UK,» *Journal Environmental Management*, vol. 112, pp. 267-274, 2012.
- [124] W. R. Leite, P. Gottardo, P. Pavan, F. Belli y D. Bolzonella, «Performance and energy aspects of single and two phase thermophilic anaerobic digestion of waste activated sludge,» *Renew. Energy*, vol. 86, p. 1324–1331, 2016.
- [125] C. Sánchez, M. E. Patiño, J. Alcántara, Y. Reyes, M. Pérez y E. Ortiz, «Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares,» *Rev. Int. Contam. Ambie.*, vol. 32, n° 2, pp. 191-198, 2016.
- [126] F. Fantozzi y B. Cinzia, «Anaerobic Digestion Of Mechanically Treated Ofmsw: Experimental Data On Biogas/Methane Production And Residues Characterization,» *Bioresource Technology*, vol. 102, pp. 8885-8892, 2011.
- [127] M. H. Gerardi, « The microbiology of anaerobic digesters.,» New York: Wile John & Sons, 2003.

- [128] T. Forster Carneiro, M. Pérez y L. I. Romero, «Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste,» *Bioresource Technol.*, vol. 99, pp. 6994-7002, 2008.
- [129] J. D. Browne y J. Murphy, «The impact of increasing organic loading in two phase digestion of food waste,» *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 69-76, 2014.
- [130] I. Angelidaki y W. Sanders, «Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants,» *Environmental Science and Biotechnology*, vol. 5, pp. 927-934, 2004.
- [131] E. Castillo, E. Cristancho y 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, 2003.
- [132] R. C. Ruiz, «Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia,» Universidad Nacional de Colombia, Palmira, 2017.
- [133] B. Parra Orobio, A. Donso, J. Ruiz, Valencia J y P. Torres , «Effect of inoculum on the anaerobic digestion of food waste accounting for the concentration of trace elements,» *Waste management*, pp. 342-349, 2018.
- [134] K. Sliman, S. Fathya, K. Assia y M. Hamza, «Influence of Inoculums/Substrate Ratios (ISRs) on the Mesophilic Anaerobic Digestion of Slaughterhouse Waste in Batch Mode: Process Stability and Biogas Production,» *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 57-63, 2014.
- [135] F. Caicedo M, «Diseño, construcción y arranque de un reactor u.a.s.b. piloto para el tratamiento de lixiviados,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2006.
- [136] S. Montalvo y L. Guerrero, « Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás.,» Universidad Técnica Federico de Santa María, Valparaíso, Chile, 2003.
- [137] J. Huang, C. Wu y C. Chen, «Microbial activity in a combined UASB - activated sludge reactor system,» *Chemosphere*, pp. 1032 - 1041, 2005.
- [138] C. González, P. Nieto, C. León y P. García, «Solids and nutrients removals from the liquid fraction of swine slurry through screening and flocculation treatment and influence of these processes on anaerobic biodegradability,» *Bioresource Technology*, vol. 99, pp. 6233 - 623, 2008.
- [139] D. Sponza y O. Ağdağ, «Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors,» *Process Biochemistry*, p. 2157–2165, 2004.

- [140] T. E. Lai, A. K. Koppar, P. C. Pullammanappallil y W. P. Clarke, «Mathematical Modeling of Batch, Single Stage, Leach Bed Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste,» *Energy Systems - Optimization in the Energy Industry*, p. 233–275, 2009.
- [141] P. Firmino, R. Farias y P. Carneiro, « Effect of hydraulic retention time , recirculation and co- substrate concentration on anaerobic BTEX removal,» de *13th World Congress on Anaerobic Digestion*, 2013.
- [142] S. Y. Xu, H. P. Lam, O. Karthikeyan y J. W. Wong, «Optimization of food waste hydrolysis in leach bed coupled with methanogenic reactor: Effect of pH and bulking agent,» *Bioresource Technology*, p. 3702–3708, 2011.
- [143] L. Rodríguez Perdigón, «Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos – FORSU,» Universidad EAN, Bogotá, Colombia, 2014.
- [144] G. Encarnación y L. Enríquez, «Evaluación técnica ambiental de un reactor anaerobio de alta concentración de sólidos volátiles,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [145] O. Lahav y B. Morgan, «Titration methodologies for monitoring of anaerobic digestion in developing countries,» *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, p. 1331 – 1341 , 2004.
- [146] S. Lansing, J. Martin, R. B. Botero, T. da Silva y E. D. da Silva, «Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease,» *Bioresource Technology*, vol. 12, nº 101, p. 4362–4370., 2010.
- [147] V. N. Nkemka y X. Hao, «"Start-up of a sequential dry anaerobic digestion of paunch under psychrophilic and mesophilic temperatures,» *Waste Management*, 2016.
- [148] K. Y. Show, Y. Wang, S. F. Foong y J. H. Tay, «Accelerated start - up and enhanced granulation in up flow anaerobic sludge blanket reactors,» *Water Research*, vol. 38, p. 2293 – 2304, 2004.
- [149] S. K. Cho, D. H. Kim, Y. M. Yun, K. W. Jung, H. S. Shin y S. E. Oh, «Statistical Optimization Of Mixture Ratio And Particle Size For Dry Co-Digestion Of Food Waste And Manure By Response Surface Methodology,» *Korean Journal Of Chemical Engineering*, pp. 1-4, 2013.
- [150] J. Fernández, M. Pérez y L. Romero, «Kinetics Of Mesophilic Anaerobic Digestion Of The Organic Fraction Of Municipal Solid Waste: Influence Of Initial Total Solid Concentration,» *Bioresource Technology*, pp. 6322-6328, 2010.

- [151] B. Sitorus, Sukandar y S. D. Panjaitan, «Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes,» *Energy Procedia*, pp. 176-182, 2013.
- [152] GIEM, «Manual de operación Planta Piloto de Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos El Carmen de Viboral,» Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, Sf.
- [153] GIEM, «Análisis técnico lámparas AP2 con biogás,» Medellín, Colombia, 2018.
- [154] C. A. Uribe, «Aprovechamiento térmico y eléctrico del biogás,» de *Red Para el Manejo Sostenible de Suelos*, Medellín, Colombia, 2017.
- [155] J. H. Ríos E. , «CARacterización fisicoquímica de abonos orgánicos artesanales,» Universidad Santo Tomás. Facultad de química ambiental, Bucaramanga, Colombia, 2016.