UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

RESIDUOS ORGÁNICOS PRODUCIDOS EN VIVIENDAS:

UNA MIRADA DESDE SU POTENCIAL PARA

LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura - Moravia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE ARQUITECTURA
AREA CURRICULAR DE CONSTRUCCIÓN Y HABITAT
MEDELLÍN - COLOMBIA
2017

RESIDUOS ORGÁNICOS PRODUCIDOS EN VIVIENDAS:

UNA MIRADA DESDE SU POTENCIAL PARA

LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura - Moravia

ESTEBAN HINCAPIÉ BUITRAGO.
Arquitecto

MAGÍSTER ARQUITECTO CARLOS ALBERTO MEJÍA BARRERA
Director

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de
Magíster en Construcción

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE ARQUITECTURA
AREA CURRICULAR DE CONSTRUCCIÓN Y HABITAT
MEDELLÍN - COLOMBIA
2017

AGRADECIMIENTOS

A quienes colaboraron en la estructuración y desarrollo de esta tesis.

Al arquitecto magister Carlos Alberto Mejía Barrera como director de la tesis.

A las doctoras en química Astrid Elena Sánchez Pino y Pilar García Cardona, por su apoyo y orientación en la parte experimental.

Al estudiante de química José Luis Correa Salazar, por su acompañamiento en la fase experimental.

A las administradoras del Complejo Habitacional La Herradura y a toda la comunidad por su participación como caso de estudio.

Y al resto de personas involucradas de alguna manera en el desarrollo de la tesis, como docentes, colegas y compañeros de estudios.

RESUMEN

El creciente cambio climático, el calentamiento global y el crecimiento demográfico han contribuido a la crisis energética, agravada por la generación de residuos sólidos orgánicos responsables de emisión de gases y con un alto potencial energético desperdiciado.

A partir del contexto de generación de residuos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se evaluó el potencial de energía contenido en 5.832 kilogramos de residuos sólidos orgánicos generados al mes en el Complejo Habitacional La Herradura, por medio del proceso de digestión anaerobia en reactores tipo Batch, con mezclas de sustrato, agua e inóculo de heces de cerdos: 1:3:0,2 y 1:3:0, alcanzando producciones totales de biogás de 0,2 m^3/Kg y 0,14 m^3/Kg respectivamente, en un periodo de 38 días en condiciones de temperatura de 24°C. El volumen de biogás obtenido en los reactores se evaluó a partir de la revisión bibliográfica y se determinó una equivalencia en consumo mensual de gas natural para 75 apartamentos o 1.856kW de energía eléctrica. Para el Área metropolitana del Valle de Aburrá, se estimó la producción de 7.152KW de energía eléctrica al mes, a partir del aprovechamiento de 22.319 toneladas de residuos sólidos orgánicos que dejarían de llevarse al relleno sanitario.

Los resultados indican que el tratamiento de residuos orgánicos a partir de digestión anaerobia, es una opción sostenible para reducir la contaminación, contribuir a la producción de energías alternativas y mejorar la eficiencia del metabolismo urbano.

Palabras clave: Residuos sólidos; Energía alternativa; Producción de energía; Digestión anaerobia; Manejo de residuos; Metabolismo urbano; Construcción sostenible.

ABSTRACT

The growing climate change, global warming and population growth have contributed to the energy crisis, aggravated by the generation of organic solid waste responsible for gas emissions and with a high energy potential wasted

From the context of waste generation in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, was evaluated the potential of energy content in 5.832 kilograms of organic solid waste generated in La Herradura housing complex, through anaerobic digestion process in Batch reactors, with mixtures of substrate, water and inoculum from pig manure: 1:3:0.2 and 1:3:0, reaching a total biogas production of 0,2 m^3/Kg y 0,14 m^3/Kg respectively, in a period of 38 days under temperature conditions of 24°C. The volume of biogas obtained was evaluated from the literature review, and was equivalent to the monthly consumption of natural gas for 75 apartments or 1.856 KW of electric power. For the Metropolitan Area of the Aburrá Valley, a production of 7.152KW of electric power was estimated for a month, from the treatment of 22.319 tons of organic solid waste that would not be taken to the landfill.

The results indicate that the treatment of organic waste from anaerobic digestion is a sustainable option to reduce pollution, contribute to the production of alternative energies and improve the efficiency of urban metabolism.

Keywords: Solid waste; Alternative energy; Energy production; Anaerobic digestion; Waste management; Urban metabolism; Sustainable construction

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN **ix**

ABTRACT **x**

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS **xiii**

LISTA DE FIGURAS **xiv**

LISTA DE TABLAS **xviii**

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES **1**

1.1 Tema 1
1.2 Problema 5
1.2.1 Preguntas de investigación 9
1.2.2 Objetivos 10
1.2.3 Justificación 11
1.3 Hipótesis 13

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO **14**

2.1 El Metabolismo Urbano: energía materia 14
2.2 Tratamiento de residuos sólidos 18
2.3 Digestión Anaerobia para el tratamiento de Residuos Sólidos en Colombia y el mundo: Revisión del Estado del Arte 22
2.3.1 Digestión Anaerobia 23
2.3.2 Digestión Anaerobia para el tratamiento de Residuos Sólidos como fuente de energía Alternativa en el mundo 35
2.3.3 Digestión Anaerobia en Colombia 46

Pág.

3. CAPÍTULO III: CONTEXTO 51

3.1 Residuos Sólidos en el AMVA ..……...……. 52
3.2 Emisiones y gases de efecto invernadero AMVA ..……. 58
3.3 Barrio Moravia ..……...……. 62
3.4 Vivienda Multifamiliar La Herradura ..……..……. 65

4. CAPÍTULO IV: LOS RESIDUOS EN LA VIVIENDA 69

4.1 Residuos en el Complejo Habitacional La Herradura ..…….……. 74
4.2 Caracterización de residuos ..…….....…….……. 76

5. CAPÍTULO V: POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS 78

5.1 Materiales y Métodos ..……...……..……. 82
5.2 Resultados ..……...…….....……. 89
5.3 Potencial de producción de biogás en el Complejo Habitacional La Herradura ..……...……..……. 95

6. CAPÍTULO VI: ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS 97

6.1 Biodigestores ..……...……. 99
6.2 Turbinas y Micro-turbinas de gas ..……...…….……109

7. DISCUSIÓN 116

7.1 Los residuos en la vivienda ..……...…….117
7.2 Potencial energético de los residuos sólidos orgánicos ..…..……117
7.3 Alternativas de producción de energía a partir de residuos orgánicos ..……...…….……119

8. CONCLUSIONES 121

9. RECOMENDACIONES 123

10. BIBLIOGRAFÍA 127

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Abreviaturas

AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
DA	Digestión anaerobia
GEI	Gases de efecto invernadero
PGIRS	Plan de Gestión integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá
RAS	Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico
RSO	Residuos sólidos orgánicos
RSU	Residuos sólidos urbanos
SV	Sólidos volátiles
TRH	Tiempo de retención hidráulico

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Generación de energía eléctrica en Colombia	2
Figura 2: Porcentaje del consumo de Energía eléctrica por tipo de edificación (%) para el AMVA	5
Figura 3: Porcentaje de la energía total consumida en la Evaluación del Ciclo de Vida Simplificado de una vivienda.	5
Figura 4: Porcentaje de ingresos dedicado al pago de los servicios públicos (Agua, Saneamiento y Energía), por estrato socio-económico.	6
Figura 5: Metabolismo Lineal y Circular	15
Figura 6: Esquema de metabolismos Lineal y Circular	16
Figura 7: Alternativas para manejo de residuos.	19
Figura 8: Esquema de reacción para la digestión anaerobia de materiales poliméricos	27
Figura 9: Proyección de generación de basuras hasta el año 2025	36
Figura 10: Valor del mercado del biogás, mercados mundiales: 2012-2022	37
Figura 11: Biodigestor modelo chino	39
Figura 12: Biodigestor modelo hindú	40
Figura 13: Numero de plantas de biogás en Europa	41
Figura 14: Proyecto MDL / La Curva de Rodas	47
Figura 15: Ubicación AMVA	53
Figura 16: Viajes disposición de residuos en el AMVA	54

Figura 17: Cantidad de vehículos recolectores de basura AMVA 56

Figura 18: Total emisiones Antropogénicas de GEI 1970-2010 58

Figura 19: Emisiones mundiales CH_4. 59

Figura 20: Noticia El Tiempo marzo 2016 59

Figura 21: El Tiempo marzo 2018 60

Figura 22: Estimación de emisiones en el AMVA 60

Figura 23: Fotografía histórica de El Morro en Moravia 1982 62

Figura 24: El Morro, antes y después 63

Figura 25: Viviendas por estrato socioeconómico 64

Figura 26: Complejo Habitacional la Herradura 65

Figura 27: Reunión con la comunidad en La Herradura 65

Figura 28: Cuarto de basuras en La Herradura 66

Figura 29: Número de habitantes por hogar en La Herradura 67

Figura 30: Promedio de las pruebas Saber según nivel de ingreso familiar 67

Figura 31: Composición de RSO generados en el AMVA. 70

Figura 32: Campaña para la separación de RSO en La Herradura 74

Figura 33: Bolsas de RSO recolectadas en La Herradura 76

Figura 34: Muestras de residuos orgánicos obtenidos en La Herradura 77

Figura 35: Resumen producción RSO en La Herradura 77

Figura 36: Potencial energético del Biogás 80

Figura 37: Grupos de reactores elaborados en el laboratorio 83

Figura 38: Termopar tipo K marca Fluke 50 Serie II 85

Figura 39: Medidor pH S-HG076 85

Figura 40: Balanza electrónica Shimadzu TX323L 86

Figura 41: Medición volumen de gas en laboratorio 87

Figura 42: Método de medición de volumen de gas por desplazamiento de agua 88

Figura 43: Producción de biogás acumulado 91

Figura 44: Reactor en días de alta producción de biogás 92

Figura 45: Reactor tipo Batch en días de baja producción de biogás (sedimentación). 92

Figura 46: Comportamiento temperatura para el reactor A1 93

Figura 47: Comportamiento del pH para reactor A1 94

Figura 48: Proyección de RSO para consumo de gas, según potencial 95

Figura 49: Potencial energético del Biogás producido en La Herradura 96

Figura 50: Escenarios para el método de producción de energía 98

Figura 51: Tipos de Biodigestores 99

Figura 52: Esquema biodigestor de flujo continuo 102

Figura 53: Esquema biodigestor para La Herradura 105

Figura 54: Recuperación de la inversión para Biodigestor 108

Figura 55: Ciclo de funcionamiento para turbinas y micro turbinas 109

Figura 56: Turbina de gas 110

Figura 57: Partes de una micro-turbina 111

Figura 58: Eje alternador de una micro-turbina 111

Figura 59: Recuperación de la inversión para Biodigestor + Microturbina 115

Figura 60: Régimen de vientos biodigestor 123

Figura 61: Implantación biodigestor 123

Figura 62: Shuts de basura 124

Figura 63: Cuarto de basuras 124

Figura 64: Usos del biogás 124

Figura 65: Red de edificaciones 124

Figura 66: Reciclaje 125

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Temperaturas de la Digestión Anaerobia 29

Tabla 2: Reportes de proporciones de inóculo ideales en varias investigaciones 31

Tabla 3: Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico 32

Tabla 4: Variables de la DA, según Estado del Arte 33

Tabla 5: Características generales del biogás 33

Tabla 6: Rendimientos de CH_4 para varios sustratos 34

Tabla 7: Proyectos MDL en el tema de Biogás en Colombia 47

Tabla 8: Resultados modelación costos por mes/vehículo de aseo 56

Tabla 9: Emisiones del sector residuos en CO_2 equivalentes para el año 2011 61

Tabla 10: Variables de entrada para reactores tipo Batch 84

Tabla 11: Resultados de producción de CH_4 en otras investigaciones. 89

Tabla 12: Comparación de diferentes configuraciones de digestores para residuos con alto contenido de sólidos. 101

Tabla 13: Cálculo para el valor de un biodigestor de 174 m3. 106

Tabla 14: Costos y recuperación de la inversión de un biodigestor 107

Tabla 15: Fertilizante producido 107

Tabla 16: Costo de biodigestor y producción mensual 108

Tabla 17: Turbina y Micro-turbinas disponibles en el mercado. 112

Tabla 18: Recuperación de inversión para biodigestor y micro-turbina. 114

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Tema

El creciente cambio climático, el calentamiento global y el crecimiento demográfico, han contribuido a la actual crisis energética que sufren diferentes regiones alrededor del mundo; por ello, la mitigación y adaptación al cambio climático, se ha convertido en acciones necesaria para afrontar esta crisis, mediante alternativas que permitan reducir los niveles de contaminación y generar respuestas a estas nuevas condiciones.

Desde el ejercicio de la construcción, la sostenibilidad se ha convertido en la principal área de trabajo para enfrentar los retos que impone el cambio climático, a partir del desarrollo de construcciones sostenibles, edificios más eficientes y el uso de energías alternativas. “Se entiende por construcción sostenible el conjunto de medidas pasivas y activas, en diseño y construcción de edificaciones, que permiten alcanzar los porcentajes mínimos de ahorro de agua y energía… encaminadas al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social” (MINVIVIENDA, 2015), se trata, pues, de construcciones que pueden reducir el consumo de recursos y energía, a partir de diferentes acciones, entre las que se encuentra la generación de energías renovables para adaptarse al cambio climático.

La generación de residuos y el consumo de energía son dos de los aspectos más críticos para la mitigación del cambio climático, aspectos que se evidencian principalmente en la cantidad de residuos sólidos generados por ciudades que contribuyen a la producción de emisiones en botadores a cielo abierto, de la mano de dinámicas de consumo y producción energética, como el uso de combustibles fósiles y la generación hidroeléctrica, en donde "los grandes embalses impactan el entorno social y ambiental debido a la producción de Metano CH_4 y Dióxido de Carbón CO_2 que constituyen gases de efecto invernadero, el conflicto entre uso de agua para irrigación y generación de energía eléctrica y la problemática de la relocalización de comunidades afectadas por las inundaciones" (Ministerio de Minas y Energía, 2007, pág. 219). Este tipo de dinámicas, tanto la generación de residuos como la producción de energía, están directamente relacionadas con la sostenibilidad del metabolismo urbano y el uso eficiente de los recursos.

La energía eléctrica, para el caso de Colombia, se ha convertido en un asunto complejo debido a la poca estimulación para diversificar su generación, condición que refuerza la dependencia a fuentes de generación hidráulica que representan el 64,2% del total de energía eléctrica del país (AMVA, 2015). La Unidad de Planeación Minero Energética llama la atención sobre el cambio climático y la dependencia a la hidroproducción; "esta fuente puede no ser la más deseable, y no solo por los riesgos de modificación de ciclos hidrológicos y reducción de las precipitaciones, sino

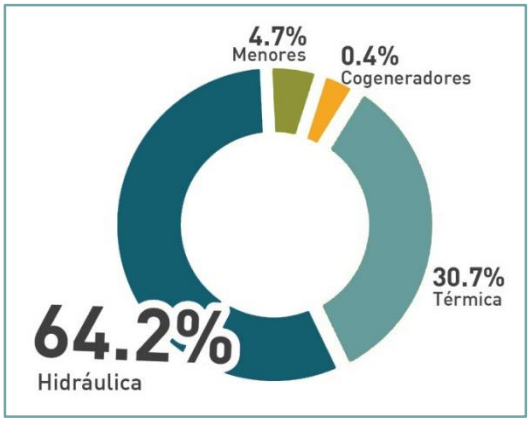


Figura 1: Generación de energía eléctrica en Colombia (AMVA, 2015, pág. 95)

por las dificultades y restricciones de entorno para la construcción de este tipo de infraestructura" (UPME, 2015, pág. 94). A partir de este estudio se determina la importancia de garantizar el suministro eléctrico y por lo tanto, la necesidad de diversificar la canasta de generación de energía.

Estas dinámicas tradicionales de generación, hacen que desde el inicio del ciclo de metabolismo urbano se generen afectaciones al medio ambiente, que empeoran con el alto consumo de energía en las ciudades, que agudizan la adaptación al cambio climático y contribuyen a la ineficiencia del metabolismo urbano, a partir de relaciones insostenibles con los ecosistemas que proveen gran cantidad de recursos y energía malgastados, convertidos en residuos que son expulsados nuevamente para contaminar ecosistemas a un ritmo que pone en duda la relación de la ciudad con su medio.

"La población del área metropolitana requiere una superficie 47 veces mayor para satisfacer todas sus necesidades, o bien, requiere el 86% del área total del departamento de Antioquia que tiene una extensión de 63.612 Km^2." (AMVA, 2015, pág. 126), para satisfacer necesidades con recursos como: alimentos, sumideros de carbono, agua y generación de energía. Para el caso del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el consumo de recursos supera la cantidad de recursos disponibles en la misma, por lo que deben ser importados desde otras regiones y ecosistemas, para devolverlos en forma de residuos contaminantes. Este déficit en la producción de recursos para autoabastecerse, ilustra la ineficiencia del metabolismo urbano, que consume gran cantidad de recursos y perjudica a las regiones y ecosistemas cercanos que asumen las cargas generadas por el Área

Metropolitana, reflejadas principalmente en el deterioro ambiental y el agotamiento de recursos.

Como respuesta a lo anterior, surgen múltiples enfoques desde la construcción sostenible, que permiten pensar en ciudades y edificaciones más eficientes, con menos desperdicios y nuevas alternativas para la producción de energía, a partir de fuentes renovables que reducen la dependencia a fuentes externas de energía tradicionales permitiendo un mayor aprovechamiento de recursos, además de la posibilidad de utilizar parte de los residuos sólidos producidos en los edificios, en otros usos.

Uno de los acercamientos a la sostenibilidad se desarrolla a partir de los residuos sólidos urbanos, como lo aborda Hans Tammemagi en su libro: *The Waste Crisis, lanfills, incinerators, and the search for a sustainable future*, en donde se describen los tratamientos utilizados para el manejo de residuos a lo largo de la historia, como incineración y rellenos sanitarios, entre otros, que con el crecimiento de la población y las crecientes afectaciones al medio ambiente se han convertido en métodos que comprometen la sostenibilidad de las ciudades en la actualidad. A partir de esta crisis del manejo de los residuos, surgen alternativas como el reciclaje y la digestión anaerobia, para el aprovechamiento de los residuos sólidos como materiales reutilizables para nuevos procesos y para la obtención de energía.

Desde la construcción sostenible, es necesario integrar este tipo de alternativas que involucren la generación de energía, reducción y aprovechamiento de residuos a la concepción de las edificaciones y ciudades, como elementos claves para la eficiencia del metabolismo urbano.

1.2 Problema

En Colombia, el fenómeno de “El Niño” y los periodos de sequía intensa, ocasionaron en 2016 una de las mayores crisis energéticas de la última década; a lo anterior se ha sumado el crecimiento demográfico y el calentamiento global, que problematizan los hábitos de consumo energético, los costos de la energía eléctrica y las pocas fuentes de energía alternativa.

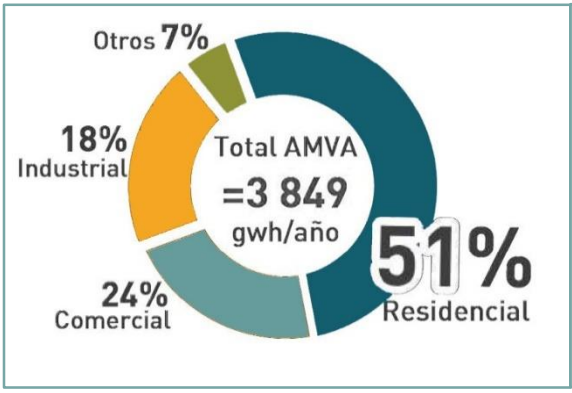


Figura 2*: Porcentaje del consumo de Energía eléctrica por tipo de edificación (%) para el AMVA (AMVA, 2015, pág. 97)*

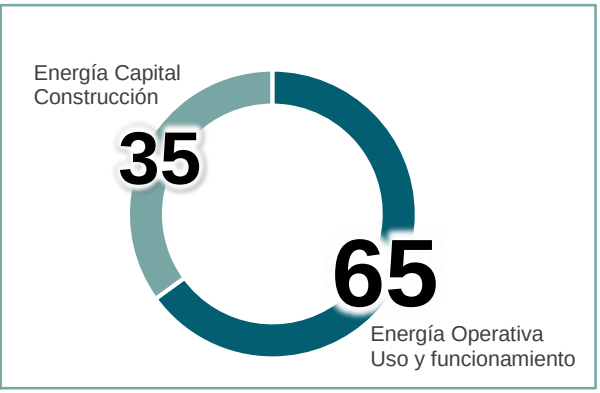


Figura 3: Porcentaje de la energía total consumida en la Evaluación del Ciclo de Vida Simplificado de una vivienda. Adaptado de: (Muñoz, Zaror, Saelzer, & Cuchi, 2012, pág. 141)

El sector residencial, constituía el 51.2% del consumo nacional de energía eléctrica en 2009, convirtiéndose en uno de los sectores más influyentes en la demanda energética del país por encima de otros sectores como el industrial. (UPME, 2010). Según estadísticas del 2015 en la Política Pública de construcción sostenible para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), el consumo de energía eléctrica según el tipo de edificación, indicaba que el sector residencial representaba el 51% frente a otro tipo de edificios, evidenciando el potencial de ahorro a futuro en este sector específico.

El total de la energía consumida por este tipo de edificaciones, según las Guías de Construcción Sostenible para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en adelante

AMVA, puede clasificarse en: 1.Energía capital (durante el proceso de diseño, extracción, producción de materiales y construcción) y 2.Energía operativa (utilizada durante el ciclo de vida aproximado de 50 años de la edificación), representando el 35% y el 65% respectivamente, según Muñoz y otros (2012) en estudios realizados para un análisis del ciclo de vida para una vivienda.

Frente a estas circunstancias se tiene en cuenta que si bien, la energía capital empleada para la construcción de edificios nuevos podría ser sujeta a control y regulaciones a través de decretos o leyes que promuevan proyectos futuros más sostenibles, la energía operativa es la que representa un valor considerablemente mayor y en el cual se ubica la mayoría de la población que habita viviendas existentes; en muchos casos, viviendas con más de 20 años de construcción que no podrían recuperar la energía capital empleada en su construcción, aunque, sí podrían minimizar el uso de energía operativa, durante lo que queda de su vida útil o contribuir con la producción de energía, con el fin de reducir el elevado consumo energético del sector residencial.

La energía operativa en Colombia, utilizada durante el ciclo de vida de las viviendas, está constituida en su mayoría por energía eléctrica y es subsidiada para los estratos 1, 2 y 3, según la Ley 142 de 1994 que a partir de los criterios de la eficiencia económica exige que los estratos 5 y 6 contribuyan al pago de las tarifas de estratos más bajos; pese a este sistema

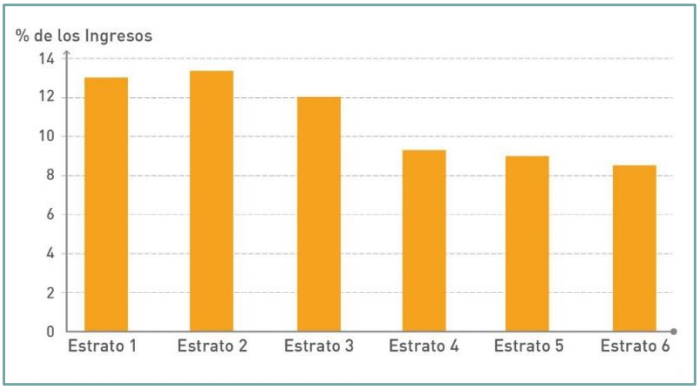


Figura 4: Porcentaje de ingresos dedicado al pago de los servicios públicos (Agua, Saneamiento y Energía Eléctrica), por estrato socio-económico. Fuente: (AMVA, 2015, pág. 51)

tarifario, son los estratos 1, 2 y 3, los que destinan un mayor porcentaje de sus ingresos para el pago de servicios públicos domiciliarios (energía, agua y saneamiento básico), según estadísticas de la Política Pública para el AMAVA (2015), lo que representa una carga económica importante que podría destinarse para inversiones en educación, alimentación y otras necesidades básicas primordiales que permitirían mejorar sustancialmente los niveles de calidad de vida de los hogares.

La ineficiencia frente al uso racional de los recursos y el metabolismo urbano han contribuido a que las edificaciones consuman altas cantidades energía y materiales, que son utilizados y posteriormente transformados en una gran cantidad de residuos devaluados. Los residuos urbanos se han convertido en una problemática compleja, debido a los altos costos en recursos y energía que se requieren para su recolección y ser transportados, incinerados o finalmente dispuestos en rellenos sanitarios. Estos procesos implican que haya una serie de salidas (outputs) de materia y energía que deben ser absorbidas por sistemas naturales externos a las ciudades, una característica propia de los *sistemas abiertos*, según la definición de Bertalanffy en su Teoría general de los distemas de 1968, clasifica a las ciudades como sistemas abiertos en donde se desperdician gran cantidad de energía y recursos.

El sector residencial además de ser el principal consumidor de energía eléctrica como se mencionaba anteriormente, también es el sector que genera la mayor cantidad de residuos, llegando a producir hasta el 68% del total de residuos del AMVA, de los que el 40,3% está compuesto por residuos como papel, cartón, plástico, vidrio, metales, textiles, residuos peligrosos, entre otros y el 59,7% restante corresponde a materia orgánica, que se dispone

en rellenos sanitarios sin ningún aprovechamiento, según el Plan de Gestión integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá (PGIRS, 2006). Este porcentaje correspondiente a residuos sólidos orgánicos se ha convertido en un problema de gran magnitud, no solo para el AMVA, sino para la mayoría de ciudades alrededor del mundo, en donde poco se han valorado los beneficios de estos residuos, que debido a su composición, tienen un alto potencial energético totalmente desaprovechado.

El consumo de energía eléctrica, los altos precios en el mercado donde se transa y la incertidumbre en la estabilidad frente a las fuentes tradicionales de la misma, suponen la búsqueda de fuentes alternativas que permitan hacerle frente a esta problemática, a través de propuestas que consideren integrar los recursos disponibles para tal fin. Es por esto, que teniendo en cuenta la problemática ambiental, la vulnerabilidad de los sistemas de generación eléctrica en el país y la escasez de recursos, podemos subrayar que la generación de residuos urbanos, las dinámicas para su tratamiento y manejo, constituyen una problemática que además de contribuir al desarrollo de ciudades con metabolismos ineficientes, significan un riesgo para el medio ambiente y un factor para que prevalezca una conciencia consumista, en la que los residuos son descartados sin tener en cuenta su potencial de ser utilizados como recursos para otros usos.

1.2.1 Preguntas de investigación

Pregunta General

¿Cuál es el potencial de energía que contienen los residuos orgánicos producidos en viviendas multifamiliares (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia) para su transformación en energía eléctrica?

Preguntas Específicas

- ¿Qué composición presentan los residuos orgánicos producidos por las viviendas? (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia)
- ¿Cuál es el potencial de energía contenido en los residuos orgánicos producidos por las viviendas? (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia)
- ¿Qué método de producción de energía es más viable para transformar la energía contenida en los residuos orgánicos en energía eléctrica para las viviendas? (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia)

1.2.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar el potencial de energía contenida en los residuos orgánicos producidos en viviendas multifamiliares para la producción de energía eléctrica (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia).

Objetivos específicos

- Caracterizar los residuos orgánicos producidos en viviendas multifamiliares (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia)
- Determinar el potencial de energía contenido en residuos orgánicos producidos en viviendas multifamiliares (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia)
- Determinar el método de producción de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos producidos en viviendas (Caso de estudio: vivienda multifamiliar La Herradura – Moravia)

1.2.3 Justificación

En Colombia, a partir del 10 de julio de 2016 es obligatoria la aplicación de la Resolución 0549 del 10 de julio de 2015 “por la cual se establecen medidas de construcción sostenible, se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones y se establecen otras disposiciones.”, para garantizar una reducción en el consumo de energía; esta reducción para vivienda debe ser de un 15% para el segundo año desde la aplicación de la resolución. Adicional a esto, los últimos estudios, como el Plan Energético Nacional: Ideario Energético 2050, revelan las preocupaciones en el abastecimiento de energía a futuro, por las afectaciones del cambio climático.

El sector residencial es el principal consumidor de energía eléctrica y el mayor generador de residuos sólidos urbanos, características que lo podrían definir como un sector altamente ineficiente. Las viviendas de estratos 1, 2 y 3 destinan una mayor proporción de sus ingresos, para el pago de los servicios domiciliarios (agua, alcantarillado, energía y saneamiento básico), pago que representa costos elevados durante el ciclo de vida de las viviendas, condición desfavorable para los hogares, en su mayoría con bajos niveles de ingreso económico (condiciones de pobreza); esto sumado a una cultura del consumo y generación de residuos, hace que el metabolismo de las ciudades genere cada vez más afectaciones sobre el medio ambiente e implique mayores costos sociales y económicos.

Las dinámicas actuales de manejo de residuos sólidos urbanos, toma los residuos generados como desechos e invierten grandes cantidades de dinero para su recolección, transporte y

disposición final, generan múltiples afectaciones, que van desde el vertimiento de lixiviados en fuentes de agua, contaminación del aire, generación de emisiones, hasta el agotamiento de recursos naturales para la fabricación de materiales como vidrio, papel, metales y otros materiales reciclables, como se expone en la Formulación del plan de gestión integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá (PGIRS AMVA, 2006); estas dinámicas no valoran ningún potencial contenido en los residuos y la posibilidad de generar energía a partir de residuos orgánicos.

Un país altamente dependiente a fuentes de energía tradicionales como hidroeléctricas y los combustibles fósiles, que representan el 63,9% y 31,1% respectivamente, según la UPME (2015), sumado al creciente cambio climático que pone en riesgo recursos indispensables como el agua, debe contemplar alternativas para la producción de energía que no sólo suplan la demanda, sino que contribuyan a la eficiencia del metabolismo urbano; por esto, evaluar el potencial para la producción de energía en los residuos orgánicos es una respuesta transversal a muchas de las problemáticas del país, empezando por los sectores más vulnerables de la población.

Si bien actualmente existen estudios para generar energía a partir de residuos orgánicos a partir del uso de la digestión anaerobia, están en su mayoría enfocados a entornos rurales, mediante el aprovechamiento de residuos de granjas y cultivos, de tal manera que se evidencia un vacío en la aplicación de métodos similares en entornos urbanos y para la producción en edificios multifamiliares, por lo que se ve la pertinencia de investigaciones que permitan ampliar el panorama de la generación de energías alternativas con la búsqueda de una mayor eficiencia para las edificaciones.

1.3 HIPÓTESIS

Es viable la producción de energía eléctrica a partir de residuos orgánicos producidos en viviendas multifamiliares. (Caso: vivienda multifamiliar La Herradura - Moravia)

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 El metabolismo urbano: energía y materia

Desde mediados del siglo XX, los términos empleados por Abel Wolman, en su publicación: Metabolismo de las Ciudades (1965) y Eugene P. Opum en *Fundamentos de Ecología* (1986), han establecido una pauta para comprender el funcionamiento de las ciudades a partir de los flujos de energía y materia. La ciudad como un organismo vivo, también consume materiales, se alimenta, crece y genera residuos, al igual que en un ecosistema natural se generan flujos de energía y materia. Los flujos de energía permiten ilustrar la eficiencia de los sistemas y entender de manera más clara los procesos metabólicos o de transformación de energía, a partir de las leyes de la termodinámica, como se explica a continuación.

Para entender el concepto de las leyes de la termodinámica aplicadas al metabolismo urbano, podemos remitirnos a actividades cotidianas en el funcionamiento de las ciudades, qué ejemplifiquen cada ley de manera clara. Por ejemplo, la primera, es la ley de *conservación de la energía*, que podemos evidenciar cuando tomamos la energía cinética, propia del movimiento del agua en un río, y mediante una presa, aumentamos la altura de caída del agua para transformarla en energía potencial, que es utilizada en generadores eléctricos para convertirla en energía eléctrica. Esta energía eléctrica es conducida a los

hogares para ser convertida en iluminación, calor, trabajo o en cualquier otro tipo de energía aprovechable. En teoría, esta energía continúa siendo la misma energía cinética que tomamos inicialmente del agua del río, que como lo sugiere el principio de la primera ley: "la energía puede ser transformada de un tipo a otro, pero no se le crea ni destruye." (Odum, 1986, pág. 62).

La energía en sus diferentes procesos de transformación; de energía cinética a potencial, de potencial a eléctrica, etc., nunca podrá ser transformada manteniendo el 100% de energía inicial, debido a que, en el proceso, parte de la energía se transforma en calor o se dispersa de otras formas, como lo indica la segunda ley de la termodinámica o ley de la *entropía*, en la que la energía se degrada o dispersa al momento de su transformación. (Odúm, 1986, pág 62). La cantidad de energía que se pierde a travéz de procesos de transformación establece la eficiencia de los sistemas y es lo que permite que se hable de sistemas de baja o alta entropía, para el caso de ciudades y ecosistemas naturales.

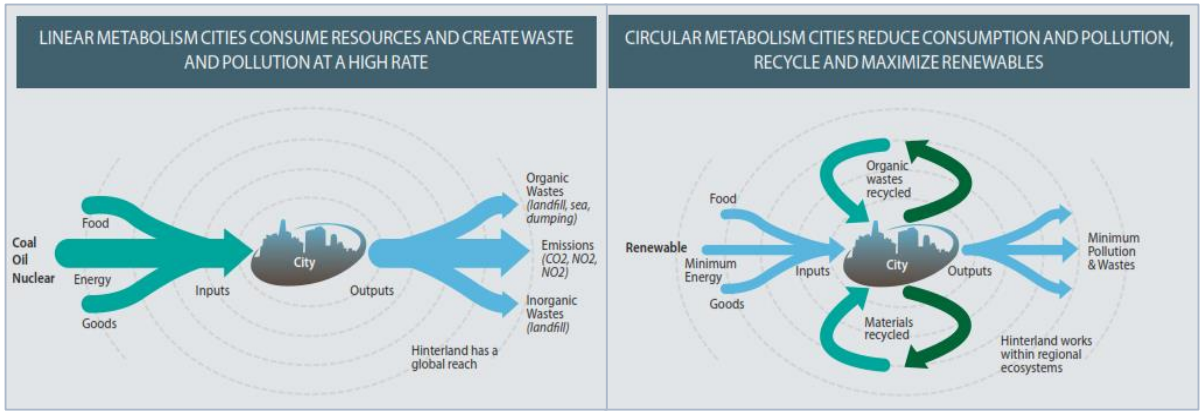


Figura 5: Metabolismo Lineal y Circular, (Girardet & Mendoça, 2009)

El metabolismo en las ciudades ha sido estudiado a partir de los flujos de energía, materia, la generación de residuos y desperdicios; según Girardet (2009) claves para identificar la eficiencia de los ciclos de la ciudad, que de acuerdo a su configuración pueden ser: de metabolismo lineal, o de metabolismo circular, este último propio de los sistemas naturales.

La ciudad ha demostrado ser un sistema altamente ineficiente, el cual debe evolucionar del metabolismo lineal, donde se consumen muchos recursos, genera residuos y alta contaminación, hacia un metabolismo circular que reduce la dependencia a fuentes externas, a partir del uso y reciclaje de los residuos generados. (Girardet & Mendoça, 2009)

En un metabolismo circular, la salida de residuos y desechos, se reduce sustancialmente al darles una segunda a partir del reciclajes o generar aprovechamientos de materiales con alto potencial de energía, reutilización o transformación en materias primas, como el caso del reciclaje, la reutilización de aguas, la elaboración de materiales a partir del reciclaje y el uso de materiales y energías más sostenibles, como energías eólicas y energías a partir de residuos orgánicos que hacen de la ciudad, un organismo más eficiente.

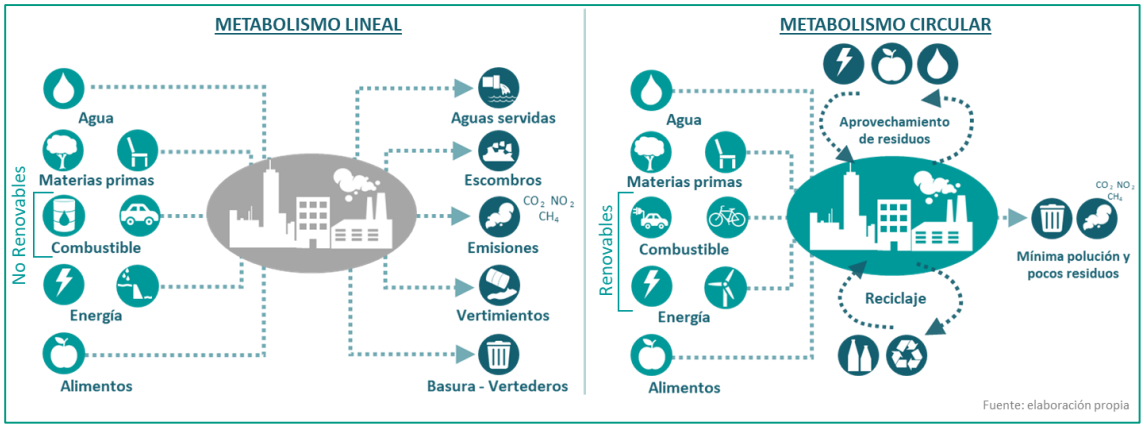


Figura 6: Esquema de metabolismos lineal y circular. Elaboración propia.

Debido a lo anterior, el metabolismo circular, es el que más se asimila a un sistema natural con baja entropía, en el que la pérdida de energía y materia se reduce considerablemente. A partir de estos conceptos, se plantean los retos a los problemas de las ciudades, como la contaminación, crisis energética y tratamiento de residuos sólidos que serán abordarán más adelante.

2.2 Tratamiento de residuos sólidos urbanos

A lo largo de la historia fue común que las calles y lotes baldíos en las ciudades sirvieran como lugar de disposición final para todo tipo de residuos, condición que propició la propagación de plagas y enfermedades como la peste negra en el siglo XIV. Hacia finales del siglo XIX muchas ciudades se dieron cuenta que las basuras en las calles estaban causando problemas de salud en la población, motivo por el que en diferentes lugares se crearon botaderos a cielo abierto y sistemas de recolección con carretas y caballos para llevar las basuras a lugares retirados. (NSWMA, 2006) Es a partir de este momento, que el manejo de residuos toma importancia para las ciudades alrededor del mundo.

Con el uso de los vertederos a cielo abierto, el aumento de residuos, malos olores, plagas y enfermedades, los botaderos de basura se trasladaron a las afueras de las ciudades, motivo que promovio el uso de plantas incineradoras de basura a principios del siglo XX, con el fin de reducir la cantidad final de residuos dispuestos en los botaderos que permitían la propagación de animales como moscas y roedores. Este tipo de plantas para la quema de basuras, dejo de utilizarse, debido a las emisiones tóxicas y a el alto consumo de energia requerido en estos procesos.

Como alternativa para manejar esta problemática, surgen los rellenos sanitarios con la opción de enterrar la basura para evitar así la proliferación de plagas, olores y demás, a partir de una inversión relativamente baja y una fácil ejecución que se convierte en una

opción económica y ambientalmente aceptable, de las más utilizadas alrededor del mundo para el tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos (en adelante, RSU).

En los rellenos sanitarios se generan una serie de subproductos resultado de la descomposición de residuos, entre los que se encuentran: lixiviados, que en algunos casos son recolectados para su posterior tratamiento, y gases con altos contenidos de hidrógeno, dióxido de carbono y metano. Estos dos últimos gases constituyen la principal causa del calentamiento global.

La composición de los residuos en los rellenos sanitarios se fue diversificando, con materiales como vidrios, plásticos y otros, que hicieron necesario el desarrollo de nuevos sistemas que se adaptaran a estas condiciones particulares. A partir de allí, surgen diferentes sistemas para el tratamiento de residuos sólidos, con sus respectivas ventajas y desventajas, las que se pueden apreciar en el esquema realizado por J. Themelis, 2011, en donde define una pirámide en la que se ubica por orden de prioridad, los sistemas para el tratamiento de residuos, por rden de prioridad, según las ventajas de cada uno.

Figura 7: Alternativas para manejo de residuos. (J. Themelis, 2011)

Según el esquema ideal para el manejo de residuos desarrollado por Themelis (2011), se contempla como primera opción; la reducción de residuos, entendiendo esto como el escenario ideal en el que una nula o baja producción de residuos supondría aminorar cargas tanto económicas como ambientales. Después de la reducción de residuos se encuentra el reciclaje, entendido como la transformación de residuos en productos nuevos o materia prima para su reutilización; materiales como el vidrio, plástico, metal, cartón y papel pueden ser reciclados, sin embargo, existen otra serie de productos creados por el hombre que no son reciclables o que no cuentan aún con la tecnología para esto y su reutilización es extremadamente costosa: baterías, papel plastificado, poliestireno expandido (icopor), papel higiénico, entre otros. Adicional a esto, están todos los residuos orgánicos que a pesar que no son materiales reciclables, entran dentro de la siguiente categoría o sistema de manejo de residuos, que se divide en Sistemas de digestión anaerobia y Sistemas de digestión aerobia, en los que se producen una serie de productos como gases, sustratos ricos en carbono y otra serie de elementos típicos del ciclo natural de cualquier elemento orgánico.

Los residuos orgánicos son materiales con altos contenidos de hidrógeno, metano, nitrógeno y otros compuestos que se obtienen a partir de la descomposición natural y son aprovechados por la naturaleza como materia prima para organismos que contribuyen a cerrar los ciclos naturales. Para efectos del manejo de residuos, como se mencionó anteriormente, la descomposición de los residuos orgánicos puede ser mediante procesos de digestión anaerobia (en ausencia de oxigeno), en donde los gases producidos, conocidos como biogás pueden ser aprovechados en otros usos por su alto contenido energético; o

puede ser a través de procesos de digestión aerobia, en donde los gases emitidos son liberados a la atmosfera. En los dos casos la descomposición es el rumbo natural y los residuos son reincorporados a la tierra como materia orgánica. Hasta este punto las opciones mencionadas anteriormente: reducción de residuos, reciclaje, digestión aerobia y anaerobia, constituyen opciones para el tratamiento de residuos que contribuyen a generar ciclos cerrados o semi-cerrados tratando de encontrar de alguna manera metabolismos circulares para las ciudades.

Adicional a estas opciones ideales en la gestión integral de residuos sólidos según Themelis (2011), hay una serie de sistemas alternativos, como es el caso de los sistemas Waste to Energy (WTE). Desarrollados a partir de la incineración de residuos, son sistemas que aprovechan el calor generado por la combustión para producir energía y reducen en cierto porcentaje las emisiones contaminantes producto de la combustión. Es importante mencionar que, a pesar de las altas tecnologías utilizadas en estos sistemas y sus altos costos de implementación, las emisiones y los residuos generados tienen un alto grado de contaminación, por lo que no constituyen una solución integral para el tratamiento de RSU.

Las tecnologías más utilizadas siguen siendo los rellenos sanitarios y los vertederos a cielo abierto, por lo que, desde la gestión integral de residuos, se contempla que este tipo de sistemas y prácticas puedan ir evolucionando hacia sistemas más eficientes y amigables con el medio ambiente en función de minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente, a la vez que permitan que las ciudades puedan cada vez más evolucionar de un metabolismo lineal a uno semi-circular o porque no decirlo circular, en donde la generación de residuos sea mínima a partir de su aprovechamiento. Con este fin, se profundizará en el

presente trabajo en la posibilidad de aplicación de la digestión anaerobia, como método de aprovechamiento de residuos, el cual se desarrolla a continuación.

2.3 Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos en Colombia: revisión del estado del arte

La digestión anaerobia (en adelante DA), como se mencionó anteriormente, es un proceso para el tratamiento de residuos que involucra la degradación de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno y comprende una serie de etapas y variables claves durante el proceso que serán explicadas más adelante para entender cómo pueden afectar los sistemas para el tratamiento de residuos.

La DA esta ha sido desarrollada tanto para el tratamiento de aguas residuales, residuos agrícolas, residuos sólidos urbanos, a diferentes escalas. Mediante una revisión del estado del arte de la DA de residuos sólidos orgánicos se pretende conocer cómo han sido utilizadas estas tecnologías y evaluar su aplicación para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en Colombia y el caso de estudio en el AMVA. Con este fin, se han referenciado investigaciones de otros países, con características similares para el caso de Colombia, debido a la ausencia de información y registros en el país.

2.3.1 Digestión anaerobia

2.3.1.1 Historia

El uso de biogás en Asiria hacia el siglo X para el calentamiento de agua es uno de los primeros registros sobre DA mencionado en artículos, pese a que no se tiene evidencia de esto, es importante mencionarlo para ver la antigüedad del uso y aprovechamiento de los procesos naturales de descomposición de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno. El uso controlado y los estudios sobre DA se remontan a finales del siglo XIX, mucho después del descubrimiento del metano proveniente de pantanos por Alejandro Volta en 1776, que concluye que hay una relación directa entre el gas producido y la cantidad de materia en descomposición. (Lusk, 1998).

Hacia 1895, las luces en las calles de la ciudad de Exter en Inglaterra funcionaron a partir del gas producido en una planta de tratamiento de aguas construida por Donald Cameron y en 1987 fue reportado un tanque de producción de gas a partir de desechos humanos en una colonia de leprosos en Bombay. “Con el desarrollo de un sistema de dos etapas conocido como el Travis Tanque (1904) y el tanque de Imhoff (1905), el enfoque se desplazó desde el tratamiento de aguas residuales al tratamiento de lodos sedimentados”. (Kumar, 2008, pág. 3). Este avance impulsó de forma considerable el uso de DA para el tratamiento de aguas residuales hasta convertirla en una de las tecnologías más utilizadas.

Kossmann, y otros, (2007), definen las siguientes fechas importantes en la evolución de la DA: 1920, primera planta de tatamiento de aguas conectada al suministro público de gas; 1940, adición de grasas para aumentar la producción de biogás; 1947, se demuestra el potencial del estiercol de vaca con una producción de biogás 100 veces mayor a las heces humanas.

La evolución de las tecnologías de DA en la primera mitad del sigo XX, se enfocó en sistemas para el tratamiento de aguas y residuos agrícolas principalmente, hasta la crisis energética de 1973. “Alrededor de 1955, la importancia del biogás se redujo significativamente, ya que el biogás ya no era rentable debido a un exceso de petróleo.” (Deublein & Steinhauser, 2008, pág. 30, traducción propia). Es después de la década del 70, que la DA comienza a tener acogida en el mundo y surge interés en aplicaciones para el tratmiento de RSU y generación de energía, como se explicará en los siguientes capítulos.

2.3.1.2 Definición

La DA es la descomposición de materia orgánica, llevada a cabo sin presencia de oxígeno, por organismos anaerobios (bacterias, levaduras, etc.). En este proceso se descomponen cadenas de elementos complejos como carbohidratos, proteínas y lípidos, hasta llegar a elementos sencillos como dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2), metano (CH_4), nitrógeno (N_2), y ácido sulfúrico (H_2S) principalmente, estos elementos componen el biogás (nombre común que se le da a la mezcla de gases producto de la DA) y un residuo

sólido orgánico llamado Biol, que comúnmente es utilizado como fertilizante para cultivos y plantas.

Para la DA su estado del arte se encuentra desarrollado a partir de sus etapas, variables, productos e inhibidores;| por diferentes autores que realizan aportes sobre condiciones específicas en las que investigaron la DA. A continuación, se desarrolla el tema a partir de algunos de estos autores.

2.3.1.3 Etapas de la Digestión Anaerobia

Las diferentes investigaciones dividen el proceso de la digestión anaerobia en 4 etapas, en cada una de las cuales hay una degradación progresiva hasta llegar a la producción de biogás (CH_4, CO_2, H_2, etc.). Las etapas se desarrollan a partir de las reacciones que se llevan a cabo en cada una de ellas; sin embargo, durante el proceso, interactúan una gran cantidad de variables biológicas como microorganismos, hongos, bacterias y no biológicas, como se muestra en la figura 7, además de otras variables externas como temperatura, agitación, iluminación y otras, que hacen que la DA sea un proceso altamente complejo que puede tener variaciones y comportamientos diferentes, según las condiciones particulares en que se desarrolle. A continuación, se menciona cada etapa con una breve descripción:

- **Hidrólisis:**

Llamada por algunos autores como licuefacción (Christy, Gopinath, & Divya, 2014), es la primer etapa de la DA; en esta, la materia orgánica constituida por elementos complejos

como proteínas, carbohidratos y lípidos son transformados con la ayuda de encimas extracelulares (proteinasa, celulosa, etc.) en aminoácidos, azúcares simples, ácidos grasos y algunos alcoholes, como elementos más simples que podrán ser absorbidos por los diferentes microorganismos en la digestión. (Schnürer & Jarvis, 2010)

- **Acidogénesis:**

En esta segunda etapa, también llamada etapa fermentativa o fermentación (Min. de Energía Chile, 2011), los productos de la Hidrólisis son degradados en ácidos orgánicos más simples (acético, propinoíco, butírico, etc.), alcoholes, amoniaco, CO_2 e H_2. (Adekunle & Okolie, 2015) Según Christy, Gopinath y Divya, "la transición del material orgánico a los ácidos orgánicos hace que el PH del sistema caiga; Esta condición es beneficiosa para las bacterias acidogénicas y acetogénicas". (2014, pág. 170)

- **Acetogénesis:**

En la tercera etapa de la DA, el ácido acético y el hidrógeno producido en la acidogénesis pueden ser procesados directamente por las bacterias metanogénicas, mientras el resto de ácidos orgánicos "deben ser transformados en productos más sencillos como acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas" (Min. de Energía Chile, 2011). Las bacterias acetogénicas son extremadamente sensibles al O_2, y tienen un PH óptimo cercano a 6 (Christy et. al, 2014). El Ph óptimo varía según los organismos que actuan en cada etapas y es una variable importante para garantizar la estabilidad de todo el proceso, la cual será aborada más adelante.

- **Metanogénesis:**

En la cuarta y última etapa, el ácido acético, el H_2 y el CO_2 son transformados en CH_4, CO_2 y ácido sulfúrico H_2S, este último "un gas corrosivo e indeseable" (Ferrer & Pérez, 2010) típico de las bacterias metanogénicas.

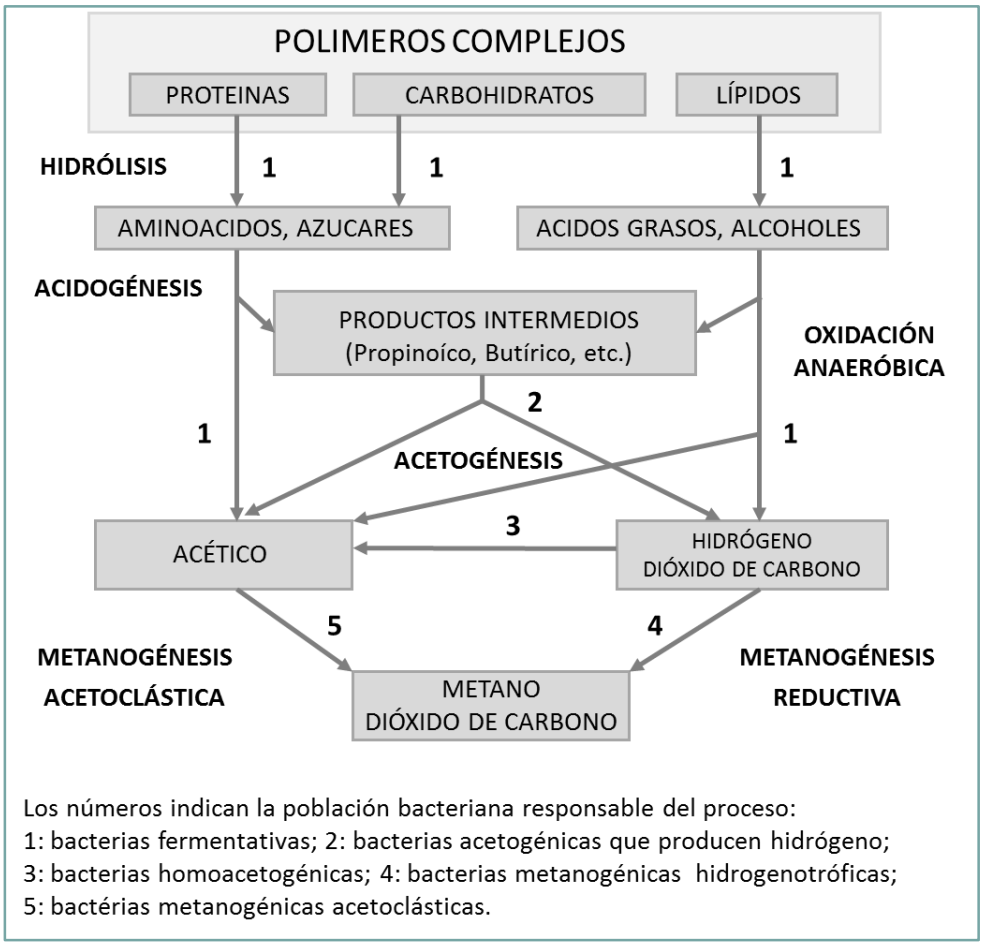


Figura 8: Esquema de reacción para la digestión anaerobia de materiales poliméricos. Adaptado de: (Pavlostathis & Giraldo-Gomez, 1991)

2.3.1.4 Variables e inhibidores de la DA

El estudio de inhibidores de la DA, tiene un avance significativo a través de diferentes investigaciones enfocadas en estudiar la producción de CH_4 con diferentes tipos de variables como temperatura, tamaño de partícula, PH, relación inóculo/sustrato, contenidos de Calcio, Metales, entre otros. Ciertas variables no constituyen en sí un inhibidor para la DA, sin embargo, contribuyen a una mayor o menor producción de CH_4 durante el proceso. Es imprescindible tener en cuenta que estas variables contribuyen a establecer un desarrollo del campo de conocimiento y después se aplicarán a cada caso de estudio con sus particularidades.

Las siguientes variables se obtienen a partir de investigaciones y diferentes autores:

- **Temperatura:** según la literatura, hay tres rangos de temperatura definidos para la DA: Psicrofílico, por debajo de 27 °C; Mesofílico, entre 28 y 33 °C y Termofílico de 34 a 80 °C. Una mayor temperatura, incide en que el tiempo de digestión sea menor, debido a que aumenta la solubilidad del sustrato y el control de agentes patógenos se incrementa. H. Gerardi (2003) coincide con la mayoría de estudios que indican que el rango termofílico es el ideal para la DA; sin embargo es importante tener en cuenta que alcanzar altas temperaturas requieren gastos de energía, que para la aplicación en sistemas en entornos rurales, o sistemas cuya finalidad es producir energía, gastar esta energía adicional no es siempre algo factible.

Bacterias	Rango de Temperaturas °C			Tiempo de retención (días)	Sesibilidad
	Mínimo	Óptimo	Máximo		
Psicrofílicas	4-10	15-18	25-30	>100	±2°C/hora
Mesofílicas	15-20	28-33	35-45	30-60	±1°C/hora
Termofílicas	25-45	50-60	75-80	10-16	±0,5°C/hora

Tabla 1: Temperaturas de la Digestión Anaerobia. (González Cabrera, pág. 33)

- **PH:** la alcalinidad o acidez de la mezcla es importante para la estabilidad de los microorganismos, comprendiendo rangos específicos para cada tipo de bacteria, como se menciona en el *Manual de Biogás* (Min. de Energía Chile, 2011), para organismos acidogénicos es entre 5.5 – 6.5, organismos metanogénicos entre 7.8 – 8.2. Se establece un PH adecuado para todo el proceso, entre 6.8 – 7.4. La adición de reactivos, como bicarbonato de Sodio ($NaHCO3_3$) es común, para controlar el PH.

  Se recomienda que el PH no descienda por debajo de 6.0, "Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas" (Min. de Energía Chile, 2011), esto se debe a la inhibición de bacterias metanogénicas.

- **Tamaño de partícula:** Varios autores coinciden en que entre menor sea el tamaño de partícula, mayor es el potencial de producción de CH_4 y la velocidad de la digestión, como se evidencia en investigaciones como: *Influence of Particle Size and Temperature on Methane Production From Fique's Bagasse* realizada por

Castro, Guzmán, & Escalante en 2012, en la que realizaron pruebas de DA, con tamaños de bagazo de 5mm, 2.36mm, 0.85mm y Nalinga & Legonda en 2016 con la investigación *The Effect of Particles Size on Biogas Production*, analizaron la digestión de tamaños de particula de 2.5mm, 0.05mm y 0.001mm. En ambos casos, el menor tamaño genero el mayor rendimiento.

- **Niveles de Luz:** Las investigaciones respecto a esta variable están poco desarrolladas; estudios recientes indican que bajos niveles de luz tienen un efecto positivo en la DA, como investigaciones que hablan de 2.700 luxes (Neshat, Mohammadi, & Najafpour, 2018) y otros autores como Yiqing Yao (2016) que se refieren a periodos de tiempo de 12 horas de exposición, sin embargo no se cuenta con los suficientes estudios para determinar la influencia de esta variable. Para el caso de levaduras en Uyaszewski, y otros, (1997) que registran la inhibición en levaduras en niveles mayores a 3.200 luxes, siendo un caso diferente al de los organismos de la DA.

- **Relación Inóculo / Sustrato:** El inóculo es generalmente materia orgánica producto de un biodigestor en funcionamiento u otra fuente natural, con alto contenido de microorganismos anaerobios que pueden contribuir en el inicio y a la velocidad del proceso de DA. Se han utilizado como inóculo: lodos digeridos del tratamiento de aguas residuales, extractos de suelo, plantas de tratamiento

industrial, rumen o sustancias del intestino u órganos de animales y excrementos de animales.

Se han realizado innumerables investigaciones acerca de la relación inóculo / sustrato, algunas de estas, establecen rangos que varían desde 30% hasta 15% de inóculo sobre el total de la mezcla, pero los resultados son bastante diferentes, según tipo de inóculo y sustrato.

De acuerdo a la literatura encontrada, para la DA de sustratos orgánicos en sistemas tipo Batch (Raposo, De la Rubia, Fernández-Cegrí, & Borja, 2011), las altas concentraciones de inóculo pueden inhibir el funcionamiento de los biodigestores a mediano y largo plazo, debido a sobrecargas o cambios del equilibrio de la composición. Si bién hacen enfásis en la heterogeneidad de los inóculos, dependiendo de la edad, composición, densidad y población microbiana, se recomienda para tener una mínima estandarización, no combinar inóculos y tomarlos de la misma fuente.

El inóculo no debe superar el 60% de la mezcla del reactor para DA de aguas residuales (Hulshoff, 1987).

Inóculo Utilizado	% Det. por autores	Sustrato	Referencia
Excrementos bovinos tomados de biodigestor	30%	Aguas residuales de Ind. De alimentos	(Pathak & Srivastava, 2007)
Lodo de planta de tratamiento de aguas	25%	Residuos sólidos urbanos - F. org.	(Parra, y otros, 2015)
Rúmen Bovino	15%	Residuos sólidos urbanos - F. org.	(Silva Lopes, Duarte Leite, & Prasad, 2004)
Lodo de planta de tratamiento de aguas	10%	Residuos de alimentos de cafetería	(Molina, y otros, 2016)

Tabla 2: Reportes de proporciones de inóculo ideales en varias investigaciones. Elaboración propia a partir de otros autores.

- **Tiempo de retención hidráulico (TRH):** Es el tiempo que demora la materia orgánica en degradarse dentro del reactor; este esta relacionado directamente a la T°, composición de la mezcla, tamaño de particula, ajitación y otras variables que en conjunto pueden afectar directamente este parámetro. El TRH, puede variar desde 5 a 90 días aproximadamente, dependiendo del tipo de sistema utilizado.

- **Inhibidores**: Hay una serie de sustancias que según su proporción pueden afectar el proceso de DA, principalmente calcio CA, metales pesados y sales. (Deublein & Steinhauser, 2008)

  A continuación, se muestran en una tabla algunos inhibidores y las cantidades en que inhiben el proceso de la DA:

INHIBIDORES	CONCENTRACIÓN INHIBIDORA
SO_4^-	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
NO_3^-	0.05 mg/l
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200 - 500 mg/l
CN^-	25 mg/l
Na	3.500 - 5.500 mg/l
K	2.500 - 4.500 mg/l
Ca	2.500 - 4.500 mg/l
Mg	1.000 - 1.500 mg/l

Tabla 3: Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico (Min. de Energía Chile, 2011, pág. 49)

A continuación, en la Tabla 04, se resumen las diferentes variables utilizadas en investigaciones:

VARIABLES DIGESTIÓN ANAEROBIA / según E. del Arte								
TEMPERATURA (H. Gerardi, 2003, pág. 90)		PH (H. Gerardi, 2003, pág. 101)		TAMAÑO DE PARTICULA (Nalinga & Legonda, 2016)		NIVELES LUZ	SOLIDOS TOTALES	
°C	PROD. CH4	PH	PROD. CH4	TAMAÑO PARTICULA - mm	PRODUCCIÓN %CH4	Luxes	% ST	ml CH4 /gr
≥ 35	Optima	7,0 - 7,2	Optima	0,001 mm	70%	No reporta	10%	180
32 - 34	Favorable	7,3 - 8	Favorable	0,05 mm	66%	inhibición en levaduras>	20%	170
21 - 31	Favorable	6,0 - 6,9	Favorable	2,5 mm	55%	3,200 lx	30%	140
< 21	Poco Favorable	< 6,0 / >8,0	Poco Favorable					

Tabla 4: Variables de la DA, según Estado del Arte. Fuente: Elaboración propia a partir de otros autores.

2.3.1.5 Productos

Los productos de la DA, son principalmente dos: el primero, una mezcla de gases, conocida como Biogás, como se mencionaba anteriormente con contenidos de CO_2, H_2, CH_4, N_2 y H_2S principalmente. Es un gas con alto contenido calórico 22.260 kJ/lt y debido a su composición mencionada anteriormente, tiene un alto potencial energético. El segundo producto está constituido por los residuos sólidos orgánicos y se conoce como Biol, con altos contenidos de potasio, nitrógeno y otros componentes que hacen de este, un fertilizante natural empleado para cultivos y plantas.

CARACTERISTICAS GENERALES DEL BIOGÁS	
Composición	55 - 70% metano (CH_4) 30 - 45% dióxido de carbono (CO_2) 1 - 2% hidrógeno (H_2) 0 - 3% sulfuro de hidrógeno (H_2S) 0,5% nitrógeno (N2) 0,1% monóxido de carbono (CO) 0,1% oxigeno (O2) Trazas amoniaco (NH3)
Contenido Energético	6.0 - 6.5 kW h m-3
Equivalente de combustible	0.60 - 0.65 L petróleo / m^3 biogás
Límite de explosión	6 - 12% de biogás en el aire
Temperatura de Ignición	650 - 750 °C (con el contenido de CH_4 mencionado)
Presión Crítica	74 - 88 atm
Temperatura Crítica	-82.5 °C
Densidad	1.2 kg m-3
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol-1

Tabla 5: Caracteristicas generales del biogás (Min. de Energía Chile, 2011)

Los productos obtenidos de la DA no varían mucho en su composición, lo que puede variar considerablemente son las proporciones obtenidas, dependiendo del sustrato utilizado en la digestión o en algunos casos mediante el uso de co-digestión. Al modificarse las variables que intervienen en la DA, es posible modificar las proporciones y resultados específicos del proceso.

El sustrato, o materia prima para la DA, es la variable principal que determina el potencial de producción de biogás (principalmente CH_4) y sus diferentes componentes. A continuación, se muestran algunos de los rendimientos de CH_4, según el sustrato:

SUSTRATO	RENDIMIENTO m^3 CH_4 / Kg	FUENTE
Excremento fresco de Ovino	0,100	(Huerga, Butti, & Venturelli, 2014, pag. 8)
Excremento fresco de Bovino	0,050	(Huerga, Butti, & Venturelli, 2014, pag. 8)
Excremento fresco de Equino	0,045	(Huerga, Butti, & Venturelli, 2014, pag. 8)
Excremento fresco de Caprino	0,080	(Huerga, Butti, & Venturelli, 2014, pag. 8)
Excremento fresco de Porcino	0,077	(Huerga, Butti, & Venturelli, 2014, pag. 8)
Excremento fresco de Gallinas	0,060	(ICAITI, 1988, pág. 16)
Excremento fresco de Humano	0,040	(Guerra, 2011, pág. 38)
Residuos de Frutas y Verduras	0,710	(Cadavid & Bolaños, 2015)
Residuos de Poda	0,385	(Cadavid & Bolaños, 2015)
Bebidas Alcohólicas	0,240	(PSE PROBIGAS, 2009, pág. 9)

Tabla 6: Rendimientos de CH_4 para varios sustratos. Elaboración propia a partir de otros autores.

A partir de la revisión de la bibliografía sobre DA, se evidencia la complejidad del proceso biológico con multiples variables, que pueden tener diferencias significativas para muchos autores.Debido a esto, para el caso de estudio, se evaluarán las mejores variables, según varias investigaciones, para desarrollar el ejercicio de DA.

2.3.2 DA para el tratamiento de residuos sólidos como fuente de energía alternativa en el mundo

Desde la crisis del petróleo de 1973 y finales de la década de 1980, la contaminación, el medio ambiente y la dependencia a fuentes de energía alternativa se convierten en temas centrales para el futuro de la humanidad. Gracias a estos hechos y a los compromisos adquiridos posteriormente en la cumbre de Río (Naciones Unidas, 1922), la búsqueda de fuentes de energía alternativas se convierte en prioridad para muchos de los países alrededor del mundo. La preocupación por reducir los niveles de contaminación con la disminución de emisiones y residuos sólidos urbanos toma un papel importante en el contexto mundial.

Si bien la digestión anaerobia había sido utilizada anteriormente para el tratamiento de residuos sólidos urbanos, aguas residuales, residuos agrícolas y heces humanas (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2011), no había sido contemplada como una opción viable, debido a los bajos costos de los vertederos a cielo abierto y otros sistemas de recolección de residuos sólidos. Es a partir de las problemáticas ambientales y energéticas que se convierte en una alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de residuos.

A continuación, se esboza el panorama actual alrededor del mundo en cuanto la generación de residuos, fuentes de energía y uso de DA.

2.3.2.1 Sobre-población, cambio climático y crisis energética.

Según el Banco Mundial (2012, pág. 11), hacia el año 2025 se tiene previsto un aumento en la población urbana de 2.982 millones a 4.287 millones (aproximadamente 70%), estas proyecciones prevén un incremento en el metabolismo urbano, reflejado principalmente en la generación de residuos y el consumo de energía, aspectos que generan preocupación actualmente y aún más hacia el futuro.

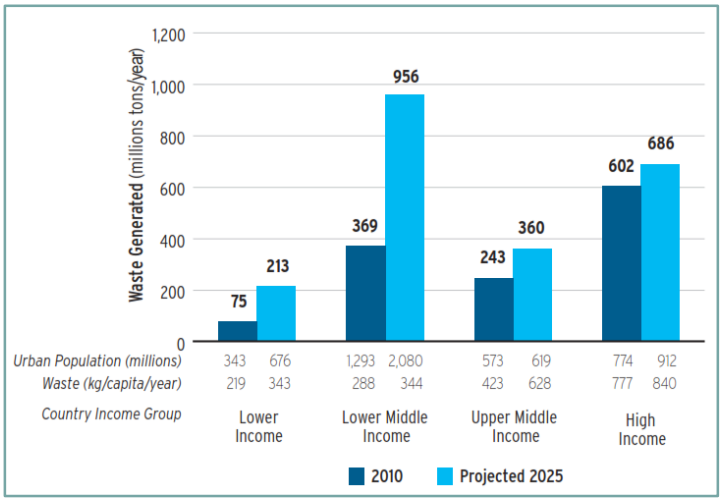


Figura 9: Proyección de generación de basuras hasta el año 2025. (World Banck, 2012, pág. 12)

Hasta la fecha, en el tratamiento de residuos sólidos urbanos el reciclaje se mantiene como uno de los métodos más eficientes (si es bien ejecutado) para recuperar energía mediante la reutilización de materiales no biodegradables. Después del reciclaje, se encuentran los sistemas de DA, que utilizan la degradación natural para recuperar la energía contenida en la porción orgánica de los residuos sólidos a través de la producción de gases (H_2, CH_4), biol o fertilizante y una reducción de emisiones nocivas que, de no ser manipuladas, irían a la atmosfera. Estos sistemas de DA son más eficientes y ambientalmente sostenibles que los sistemas Waste to Energy (incineración de residuos) y rellenos sanitarios tradicionales explicados anteriormente.

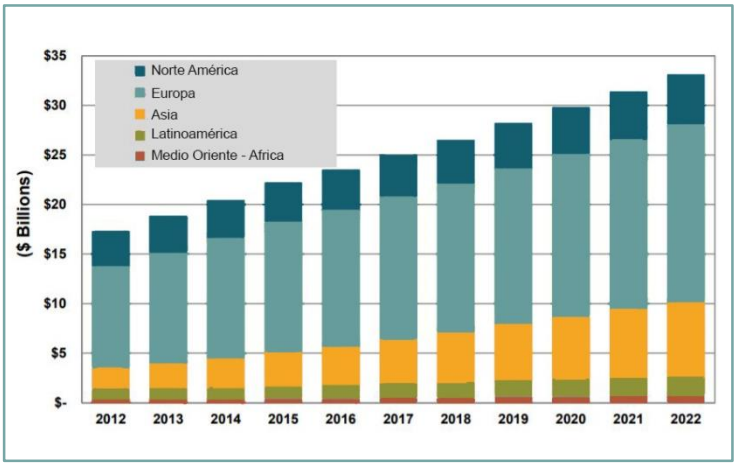


Figura 10: Valor del mercado del biogás, mercados mundiales: 2012-2022. (Pike Research, 2012)

La DA ha sido utilizada alrededor del mundo en diferentes escalas y usos. Para el caso de Norte América y Europa, este último el mayor productor de Biogás, se ha utilizado principalmente a gran escala, para el tratamiento de residuos sólidos urbanos en plantas con alta tecnología, y en el resto de países alrededor del mundo, el uso principal de la DA ha sido en entornos rurales, para el aprovechamiento de residuos de cultivos y excrementos de animales, principalmente por tres razones: primero, la alta disponibilidad de este tipo de residuos, su complicado manejo y disposición final, segundo, la poca disponibilidad de redes y abastecimiento de energía en el entorno rural y tercero, la facilidad económica de implementar la DA, dependiendo del sistema a utilizar.

2.3.2.2 Casos alrededor del mundo

El estado de la DA alrededor del mundo se realiza por continentes, debido a la solución similar que han tenido los países en cada continente y características similares en cuanto a la aplicación de nuevas tecnologías, escalas, población y otros factores que permiten agrupar el estado del arte de la DA por continentes.

La DA alrededor del mundo tiene un mayor uso en el tratamiento de aguas residuales, a partir de pozos sépticos y sistemas similares, muy por encima del tratamiento de residuos sólidos urbanos. Si bien es importante tener en cuenta este tipo de sistemas, la presente revisión bibliográfica se centra en el tratamiento de residuos sólidos, razón por la que no se incluye la DA para el tratamiento de aguas residuales en los diferentes países.

- **Asia: China e India**

La digestión anaerobia en Asia se remonta a épocas milenarias, con el uso de excrementos humanos y de animales para obtener fertilizante. Y durante la primera mitad del siglo XX, fue común la producción de biogás con residuos agrícolas (de cultivos y animales), principalmente como método para el manejo de residuos y la producción de energía en China e India. (He, 2010)

El uso de la DA en China, ha sido principalmente en el sector rural, con la producción de biogás en hogares campesinos, con tecnologías rudimentarias, como biodigestores construidos con bóvedas de mampostería u hormigón enterrados, más conocidos como biodigestores tipo “Taiwán” o modelo “Chino” (Guevara Vera, 1996). Es usual que la mayoría de biodigestores se encuentren enterrados, debido a que la temperatura se mantiene constante a diferencia de la superficie.

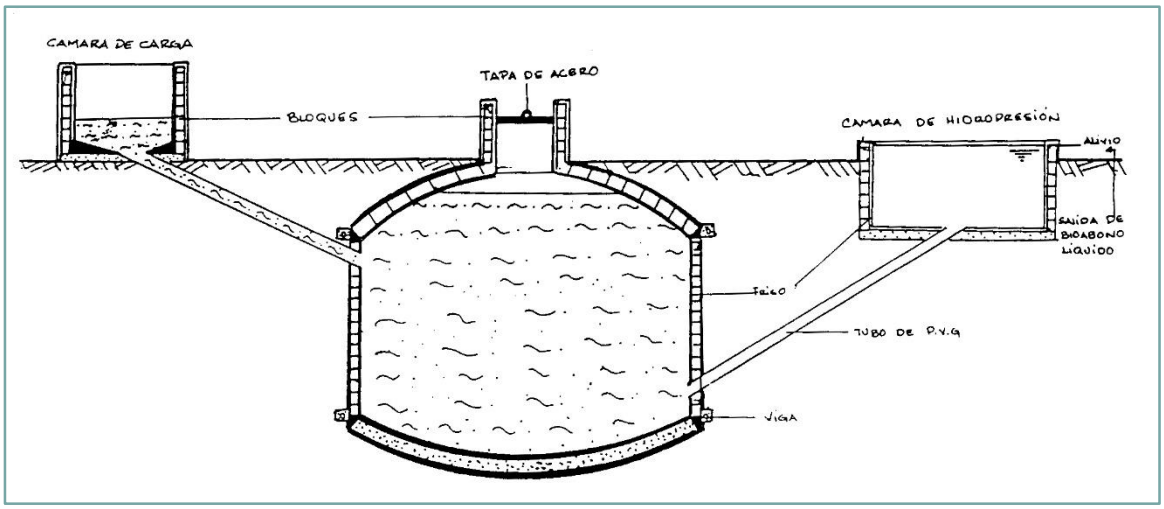


Figura 11: Biodigestor modelo chino (Guevara Vera, 1996, pág. 34)

Como se mencionó anteriormente, los residuos más utilizados para la DA, son de origen agrícola y se tiene registro de que para 1987 en China existían aproximadamente 4.5 millones de biodigestores rurales, que abastecen de gas a hogares campesinos, para cocción e iluminación principalmente. (Chen Z.-J. , 1987)

Es incipiente el uso de la DA en ciudades para el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos. A pesar que existen proyectos a gran escala, como plantas de DA en Beijing, Shenzhen, Ningbo que llevan a cabo el tratamiento de residuos a escala urbana y algunas otras plantas que han ido aplicando nuevas tecnologías en vertederos tradicionales que no representan avances representativos para el tema específico de estudio. (Xu, He, & Luo, 2016)

India es uno de los países en vía de desarrollo que más ha implementado la utilización de tecnologías de digestión anaerobia a mediana escala, especialmente en entornos rurales y suburbanos. Se han utilizado principalmente sistemas de biodigestores de flujo continuo,

conocidos como modelo "hindú" principalmente alimentados por residuos de frutas, verduras, heces de animales y residuos sólidos previamente seleccionados. La mayoría de sistemas en India, han sido utilizados exclusivamente para el aprovechamiento del biogás en procesos de cocción y sus residuos como fertilizante.

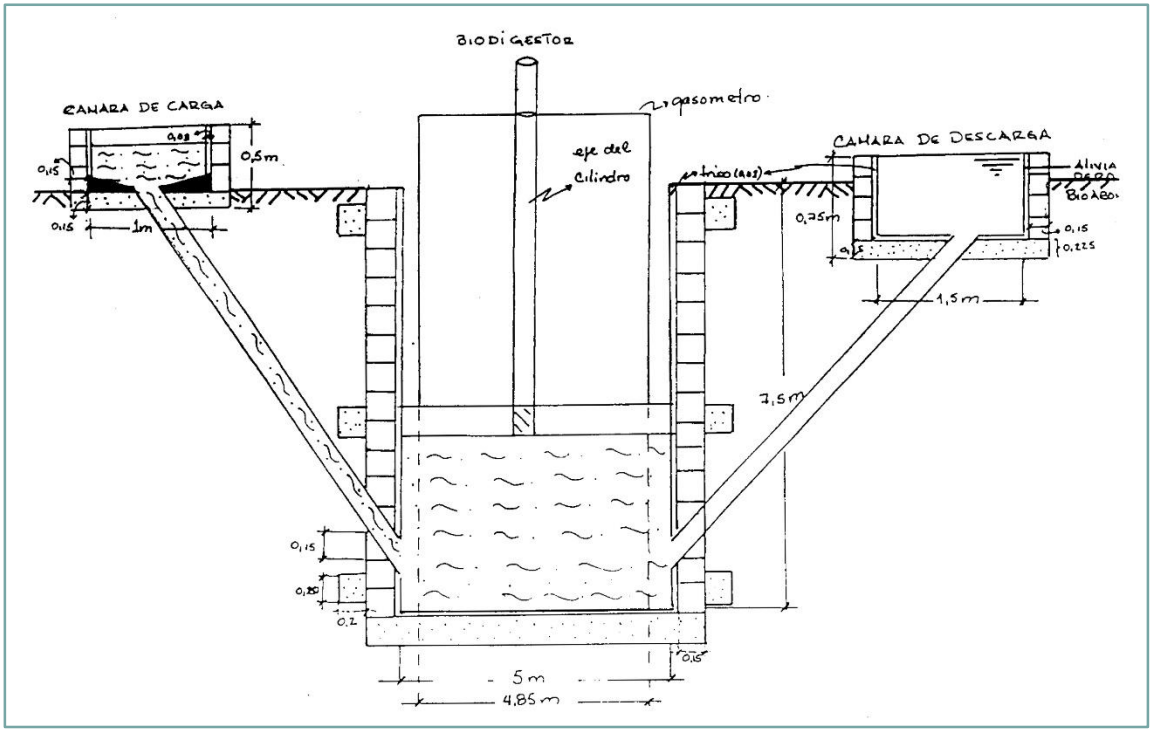


Figura 12: Biodigestor modelo hindú (Guevara Vera, 1996, pág. 35)

A continuación, se mencionan algunas de las plantas de producción de biogás reportadas en el informe *Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle-Income Countries* (Müller, 2007):

- Nueva Delhi, Bio-digestor TEAM (TERI Enhanced Acidification and Methanation),
- Bangalore, Centre for Sustainable Technologies (anteriormente ASTRA),

Según Müller (2007), muchos de los proyectos de DA en India han fracasado, debido al gran tamaño de las plantas, a la poca disponibilidad de personal capacitado para su manejo y mantenimiento. La aplicación de tecnologías avanzadas en India, no han sido fructíferas, razón por la cual se ve la necesidad de desarrollar sistemas sencillos y de pequeña escala que sean fáciles de mantener en el tiempo.

- **Europa:**

En Europa la producción de biogás está principalmente desarrollada a partir de plantas a escala urbana y entornos agrícolas que manejan un alto volumen de residuos. En estos países, las bajas condiciones de pobreza, hacen que los sistemas de DA a pequeña escala no tengan mucha acogida.

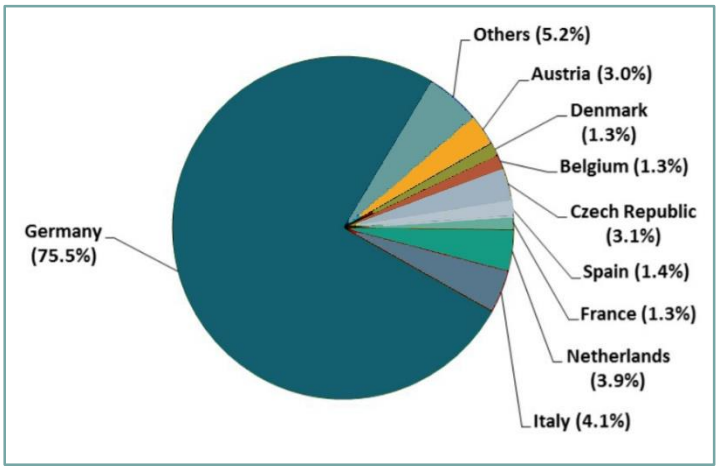


Figura 13: Numero de plantas de biogás en Europa (Raboni & Urbini, 2014)

Muchos países europeos han establecido condiciones favorables para la producción de electricidad a partir de biogás a partir de incentivos en impuestos y otros beneficios que han dinamizado el sector de las energías renovables. (European Biomass Asociation AEBIOM, 2015). Alemania es el país que lidera en cuanto al número de plantas de DA y al desarrollo de tecnologías, como la alimentación de redes públicas de gas y energía a partir de la producción en las diferentes

plantas de residuos sólidos urbanos. En países como Suiza, la utilización del biogás para vehículos representa el 60% del total del gas utilizado para estos medios de transporte, siendo el otro 40% gas natural. (ibíd., 2015).

En Europa, la inversión en fuentes de energía alternativa constituye un fuerte sector del mercado y el interés por desarrollar energías amigables con el medio ambiente hace que el desarrollo de tecnologías de DA para la producción de biogás tenga una fuerte acogida. Es importante mencionar que, debido a las condiciones económicas favorables de estos países, el desarrollo de plantas a escala urbana con altas tecnologías hace que la aplicación de la DA a pequeña escala no sea favorable.

El desarrollo de la DA en América tiene diferencias significativas entre Norteamérica y América latina, motivo por el cual se desarrollarán en diferentes apartados, dejando el caso de América Latina al final de este apartado, para darle continuidad con el caso de Colombia:

- **Norteamérica**

El desarrollo de la DA en Norteamérica se ha dado principalmente en Estados Unidos, razón por la cual, en este apartado no se mencionará el estado de la DA en Canadá y México.

En Estados Unidos, la aplicación de la DA se encuentra principalmente en el sector de manejo de residuos urbanos y el sector rural, en grandes extensiones de cultivos con altos

volúmenes de residuos, como cultivos de maíz, soya, etc, y el aprovechamiento de residuos de animales con altos contenidos en metano. No se encontraron casos reportados de tecnologías de DA a pequeña escala, como viviendas unifamiliares o multifamiliares, etc.

Según la EPA (United States Enviromental Protection Agency) en 2016, había 242 proyectos de DA en granjas operando, 196 de estos en granjas lecheras. Este sector tiene un alto desarrollo tecnológico y presenta múltiples aplicaciones, como lo reporta el informe *Methane Recovery from Animal Manures: The Current Opportunities Casebook* (Lusk, 1998).

La mayoría de rellenos sanitarios en Estados Unidos tiene aprovechamiento de energía a partir de residuos sólidos urbanos. Para marzo de 2017, 654 rellenos sanitarios generaban energía a partir de los gases obtenidos. (United States Enviromental Protection Agency, 2017).

Según el informe de Giraldo, Preckel, & Gotham (2013), los sistemas utilizados en rellenos sanitarios funcionan con toda la basura que es dispuesta en estos lugares y no hay separación adecuada de residuos sólidos. El desarrollo en Estados Unidos, está altamente tecnificado para la industria y las plantas de residuos, sin embargo hacen falta políticas para la separación de residuos y tener un manejo más eficiente de estos.

- **África:**

La introducción de tecnologías de DA en África, inició hacia la década de los 70, con el desarrollo de proyectos piloto y educación de técnicos (Mulinda, Hu, & Pan, 2013). En la región se han desarrollado biodigestores de pequeña escala en entornos rurales. Para el año 2012 se reportó la instalación de aproximadamente 17.000 biodigestores (Mulinda, Hu, & Pan, 2013).

Para el año 2007, no se tenía registro de plantas con tecnologías de DA a escala urbana, sin embargo, según Müller (2007) se desarrollaron una serie de proyectos a escala urbana en rellenos sanitarios y plantas de tratamiento, entre los que se encuentran: un biodigestor para el relleno sanitario en la ciudad de Mombasa (por la empresa JuaNguvu Ltd.), un proyecto de transformación de biogás en energía en la ciudad de Durvan (por la universidad University of KWaZulu-Natal) y otro proyecto en una planta en la Ciudad del Cabo.

El desarrollo de la DA en África tiene aplicaciones con plantas de pequeña escala, como biodigestores familiares en entornos rurales que en su mayoría utilizan el potencial de los excrementos de animales y hay un incipiente desarrollo de plantas a escala urbana, debido a los altos costos de inversión que significan este tipo de tecnologías. Adicional a esto, hay múltiples investigaciones que analizan el potencial del biogás en África y ven la viabilidad de sistemas a pequeña escala para entornos rurales, como se vienen desarrollando actualmente. (Scarlat, Motola, Dallemand, Monforti-Ferrario, & Mofor, 2015)

- **América Latina:** Argentina (Huerga, Butti, & Venturelli, 2014)

En América Latina, la introducción de los sistemas de DA fue promovida inicialmente por Organizaciones No Gubernamentales (ONGs), hacia la década de los 70, con biodigestores de tipo hindú (de domo fijo) y chinos, que posteriormente fueron reemplazados por biodigestores tubulares de plástico, más asequibles para comunidades campesinas.

Hay experiencias de un alto desarrollo de biodigestores rurales en Costa Rica, Bolivia, Perú, Colombia y algunos casos registrados en Argentina. Común en todos los países, la DA de excrementos de animales y residuos de cultivos. Muchas de las experiencias presentan problemas con el tiempo, debido a la falta de capacitación y manejo técnico de los biodigestores. (Martí-Herrero, Pino, Gallo-Mendoza,, Pedraza, & Rodríguez, 2016)

Es importante, como se mencionó en el caso de África, entender las condiciones socioeconómicas de los países en Latinoamérica, en donde la viabilidad de sistemas de pequeña escala, asequibles para poblaciones de bajos recursos debe ser un factor central para la aplicación de este tipo de tecnologías.

2.3.3 DA en Colombia

2.3.3.1 Primeros casos registrados

En Colombia, al igual que en el resto de países en América Latina, las tecnologías de biodigestores para la producción de biogás, comenzaron a utilizarse a partir de proyectos pilotos desde los años 70_S y 80_S, con las tecnologías tradicionales con mampostería, de sistemas chinos e indios. Hacia los años 90_S, el desarrollo de materiales como el plástico, permitió que la producción de biodigestores creciera de manera considerable, con el uso del biodigestor "Taiwanes". (Martí-Herrero, Pino, Gallo-Mendoza,, Pedraza, & Rodríguez, 2016).

Hay bastante desarrollo en el tratamiento de aguas residuales y desarrollo en la producción de etanol y metanol, como energías alternativas y complemento en combustibles fósiles, debido a que es uno de los combustibles de mayor uso, gran parte de la investigación en fuentes de energía alternativa se enfoca en este sector. (FAO, 2011)

2.3.3.2 Tipos de tecnología utilizados e investigaciones realizadas

Para el caso de los rellenos sanitarios en Colombia (sistema de tratamiento se RSU que predomina en el país), hay una serie de proyectos bajo el uso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). Los proyectos MDL, son proyectos que surgen del protocolo de Kioto en 1997, que promueven que empresas generadoras de emisiones, generalmente en países industrializados, inviertan en la reducción de emisiones en cualquier parte del mundo y luego incluir estas reducciones a sus metas nacionales. (CDM Watch, 2010).

Figura 14: Proyecto MDL / La Curva de Rodas. (Empresas Varias de Medellín E.S.P., 2017)

Algunos de los proyectos MDL aprobados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible son:

PROYECTO	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	AÑO
Manejo de gas en los rellenos sanitarios Curva de Rodas y la Pradera	Antioquia	Medellín	2008
Recuperación y combustión del biogás generado en el relleno sanitario La Esmeralda	Caldas	Manizales	2008
Captación, tratamiento y aprovechamiento energético del biogás proveniente del relleno sanitario Doña Juana	Cundinamarca	Bogotá	2008
Recuperación y combustión del biogás generado en el relleno sanitario El Guayabal	N. de Santander	Cúcuta	2008
Proyecto de desgasificación del relleno sanitario Antanas	Nariño	Pasto	2009
Relleno sanitario de Pirgua en Tunja, Boyacá	Boyacá	Tunja	2008

Tabla 7: Proyectos MDL en Colombia (CDM Watch, 2010)

Estos proyectos mencionados, son exclusivamente para la reducción de emisiones en rellenos sanitarios, por medio de tuberías que recolectan los gases de los residuos enterrados y lo queman por medio de chimeneas con sistemas para la reducción de emisiones; adicional a esto, no hay registro de proyectos de DA con recuperación de energía de RSU.

En la aplicación de tecnologías de DA a pequeña y mediana escala, hay registro de la construcción de 220 biodigestores de flujo continuo, por ASPROINCA (Asociación de Productores Indígenas y Campesinos) en Riosucio – Caldas, para familias en entornos rurales. (ASPROINCA, 2016). A parte de este registro, se estipula que es común el uso de biodigestores en granjas porcinas, bovinas y en algunos cultivos en entornos rurales que utilizan la DA en biodigestores plásticos, principalmente para aprovechar el metano para calefacción de animales y cocción en viviendas campesinas.

Se han desarrollado algunas investigaciones sobre el aprovechamiento de residuos de frutas, verduras y poda, para la producción de energía a partir de biogás en ciudades colombianas. El potencial de biogás (principalmente CH_4 e H_2) se determinó a escala de laboratorio a partir de los residuos frescos de frutas, verduras y poda de la central mayorista en la ciudad de Palmira (Cadavid & Bolaños, 2015). Y residuos de poda de un campus universitario y sobras de un restaurante de comida peruana en la ciudad de Manizales. (Pacheco Gonzáles, 2016) Ambas investigaciones determinan la cantidad de CH_4/Kg de residuos y en el caso de Palmira, se determina el potencial en KW.

Es importante resaltar que los residuos empleados en estas investigaciones, si bien son de fuentes controladas como el caso de frutas, verduras y residuos de poda, no cuentan con la

heterogeneidad que se pudiera encontrar para el caso de residuos de viviendas, en los que la combinación de frutas, verduras, residuos de cocina y residuos de todo tipo en aptos que hacen que el proceso de DA no sea tan estable y constante.

2.3.3.3 Potencial de utilizar la DA a pequeña escala

Para el caso de Colombia y los países en vía de desarrollo, la sobrepoblación y los metabolismos lineales, acrecientan cada vez más los efectos negativos generados por las basuras en el medio ambiente y en las mismas ciudades. Prevalecen dinámicas de recolección, transporte y disposición final de basuras, que no están concebidas para aprovechar el potencial de reutilización o valorar los residuos como un recurso.

Las condiciones sociales y económicas particulares de estos países, hacen que las inversiones en fuentes para producción de energía sean limitadas y en muchos casos existe una alta dependencia a fuentes de producción tradicionales, lo que se traduce en altos precios e incertidumbre en el servicio a futuro. La fragilidad de los sistemas de suministro y la disponibilidad a futuro de fuentes de energía tradicionales, sumado a las altas inversiones que implica la construcción de hidroeléctricas o infraestructura para la producción de energía, estos son aspectos fundamentales para considerar la producción de energía a pequeña escala como una opción para los países en vía de desarrollo y su población.

La población en estos países, constituida en gran porcentaje por hogares con bajos ingresos económicos destinan un alto porcentaje de sus ingresos para el pago de servicios públicos domiciliarios: agua, energía, gas y saneamiento básico; y esto sumado al débil apoyo estatal, permite ver la posibilidad que la DA pueda convertirse en una alternativa para generar energía a partir de los residuos orgánicos monetizando su alto potencial energético, además de contribuir a generar conciencia sobre la importancia del manejo adecuado de los residuos para empezar a verlos como un recurso y no como un residuo.

3. CAPÍTULO III: CONTEXTO

En este capítulo se dará una breve descripción del contexto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, la generación y manejo de residuos sólidos urbanos, nivel de Área Metropolitana y un acercamiento al caso de estudio: Complejo habitacional La Herradura, ubicado en el barrio Moravia.

Si bien el caso de estudio no es el fin último de la investigación, permite verificar a escala real la hipótesis de la investigación; pasando de analizar una problemática compleja, de una escala de región, a una escala menor, en la que, a partir de muestras y datos reales, es posible desarrollar experimentos de laboratorio que puedan aplicarse a entornos sociales particulares y que establecen un ejercicio base, para ser replicado en diferentes ciudades alrededor del mundo con problemáticas similares.

3.1 Residuos Sólidos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) es una situación que afecta a todas las regiones colombianas debido al acelerado metabolismo urbano, entre ellas, la Región del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), en donde, la concentración de población y la dificultad en el manejo de residuos contaminantes han significado un riesgo para la salud humana, como para los sistemas naturales.

La disposición final de los residuos en rellenos sanitarios o plantas de tratamiento, involucran gran cantidad energía en actividades, como la recolección, transporte, selección, tratamiento dependiendo del tipo de basura y disposición final en rellenos sanitarios. Este tipo de actividades traen consigo costos sociales, ambientales y económicos producto de la concepción de ciudad como un sistema abierto: “se mantiene en continua incorporación y eliminación de materia, constituyendo y demoliendo componentes, sin alcanzar, mientras la vida dure, un estado de equilibrio” (Teoría General de los Sistemas) (Bertalanffy Von, 1968, pág. 39).

El AMVA está ubicada al noroccidente de Colombia sobre la cordillera Central en el valle del río Medellín y se encuentra conformada por los municipios de: Medellín (como ciudad núcleo), Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Caldas, con una población total de 3.5 millones de habitantes para 2012 (AMVA, 2015).

Debido al crecimiento poblacional, estos municipios han sufrido un fenómeno de conurbación, vinculándolos física, social, cultural, ambiental y económicamente, motivo por el cual la administración de recursos e intervenciones sobre el territorio y sus componentes ambientales, de servicios públicos, movilidad, entre otros son de común acuerdo y tienen un gran impacto sobre toda la región.

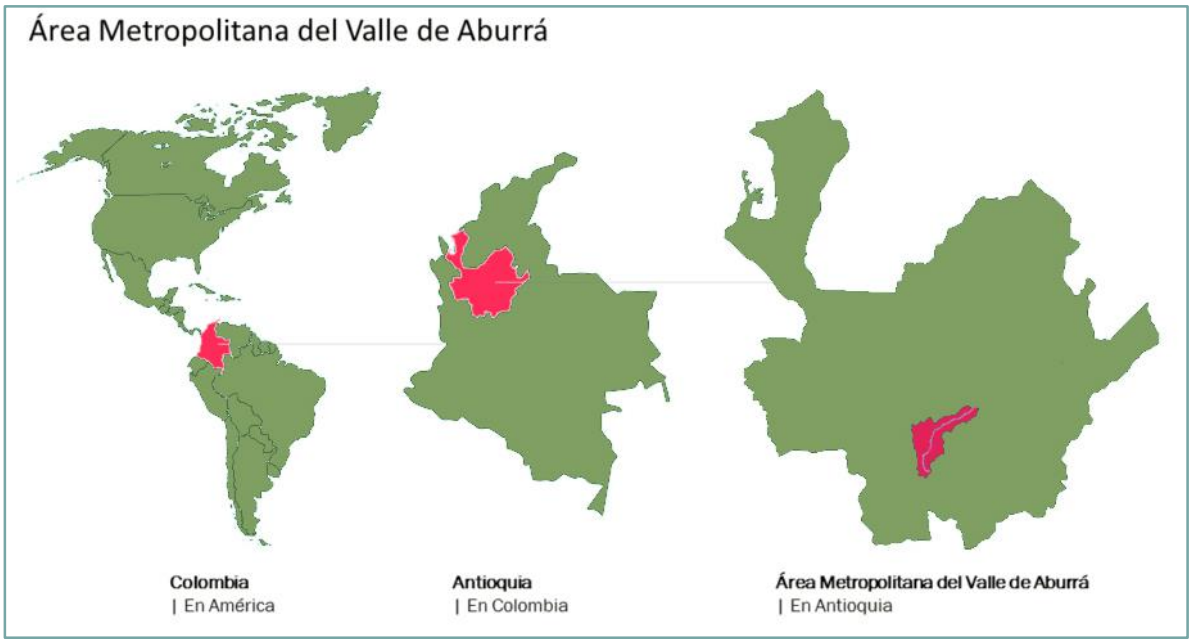


Figura 15: Ubicación AMVA, (Ingreso al Area, 2016)

Para el AMVA el número de vehículos recolectores de RSU se estima en 199, los cuales se desplazan hacia el relleno sanitario La Pradera, un promedio de 57 kilómetros hasta el municipio Don Matías, estos vehículos transportan un promedio de 55.522 toneladas de RSU al mes, lo que equivale a realizar 79.021 viajes/Año recorriendo 8’740.376 km; esto es igual a recorrer la tierra sobre su diámetro ecuatorial 685 veces.

Esta cantidad de viajes para la recolección y disposición de los residuos en el relleno sanitario, implica la generación de 30,24 Ton/año de emisiones provenientes de hidrocarburos no quemados en vehículos, esto sin tener en cuenta otra cantidad de afectaciones a otro tipo de recursos como el suelo y agua. (PGIRS AMVA, 2006, págs. 93,94)

Por ejemplo, al momento de la recolección de basuras, es común que haya vertimiento de residuos y lixiviados en las rutas de los camiones, sobre las vías que pueden llegar por escorrentía a suelos y fuentes hídricas cercanas, generando efectos nocivos sobre estos recursos naturales. Durante el recorrido y la disposición final de los residuos, muchas poblaciones cercanas se ven afectadas por los malos olores, vertimiento de residuos, generación de material particulado y otras acciones que demuestran que la disposición de residuos en lugares lejanos a las fuentes de generación, si bien alejan a la población de los peligros generados por los residuos, no es una solución integral a esta problemática. Todo esto sumado a un mínimo aprovechamiento de los residuos, hace que la vida útil de los rellenos

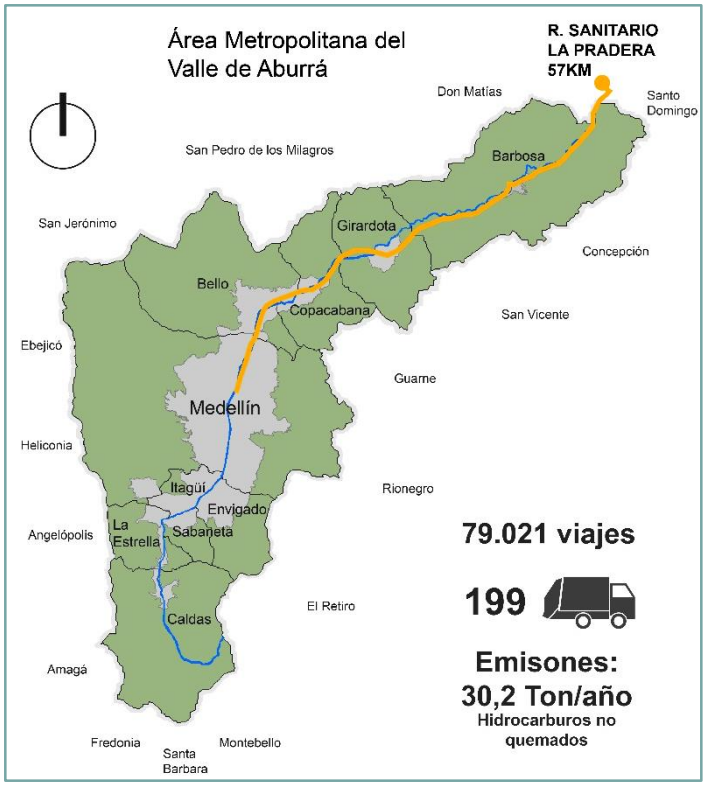


Figura 16: Viajes disposición de residuos en el AMVA. (elaboración propia)

sanitarios sea corta y deban afectarse cada vez más lugares, generando mayor presión sobre el medio ambiente.

"Los principales impactos generados por las actividades de recolección y transporte de los residuos sólidos en el ambiente construido, **son por el ruido, la generación de olores ofensivos relacionados con el derrame de lixiviados, y las emisiones atmosféricas"**. (Area Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015, pág. 124)

Del total de RSU, el 67% proviene del sector residencial discriminado respectivamente en 60% de materia orgánica, 8% papel, 11% plástico y 22% otro tipo de residuos (vidrio, metales, textiles, peligrosos, etc.), según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional Valle de Aburrá (PGIRS AMVA, 2006), estos porcentajes demuestran que existe un alto potencial de aprovechamiento de residuos orgánicos, debido a su composición ricas en hidrógeno, metano y otros elementos útiles para la producción de energía.

Para el año 2014, se publicó un estudio en el que se estudiaban las tarifas y los costos para las actividades de recolección, transporte, barrido y limpieza en diferentes municipios colombianos. (Rozo, 2014) En este estudio se discriminan los costos de un vehículo recolector de basuras al mes, en donde para la ciudad de Medellín, el costo de un vehículo al mes es de aproximadamente $18.548.000 pesos colombianos, lo que equivaldría a $3.691.052.000 al mes por los 199 vehículos utilizados para la recolección de basura en el AMVA y a $44.292.624.000 pesos al año, sólo en costos de vehículos recolectores de basura, sin tener en cuenta la disposición de los residuos en el relleno sanitario La Pradera.

Tabla 2. Resultados de la modelación por mes/vehículo.

Datos de la empresa	Bogotá				Medellín	Cali	Manizales	Ibagué	Villavicencio	Pasto	Sincelejo	Promedio
	Ciudad Limpia	Lime	Aseo Capital	Aseo Total								
	4251	4165	4304	4791	4056	4251	2742	3988	3063	2619	2807	3731
Costos directos de mantenimiento	4866	3107	4475	1770	3643	7909	2918	3265	1317	3916	2285	3588
Costos administrativos + impuestos	8666	4 899	8 586	5 411	8 071	11 654	5 141	5 369	4 686	7 509	4 927	6 811
Dotación	144	150	132	120	138	90	96	102	138	96	114	120
Costos de capital	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Respaldo	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
Total costos por mes/vehiculo	20 567	14 961	20 138	14 731	18 548	26 544	13 536	15 364	11 844	16 780	12 774	16 890
Total costos por tonelada	51,77	52,00	47,99	46,59	38,75	68,66	29,06	37,97	26,87	25,52	21,22	40,58

Tabla 8: Resultados modelación costos por mes/vehículo de aseo (Rozo, 2014)

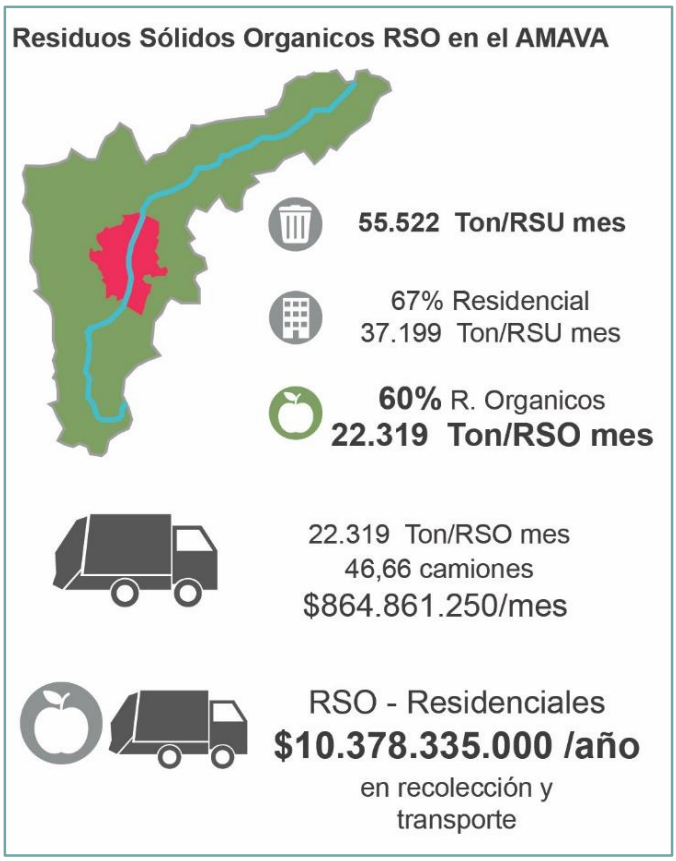


Figura 17: Cantidad de vehículos de recolección de basuras AMVA. (elaboración propia)

Para hacerse una idea más precisa de lo que cuesta el tratamiento sólo de los residuos orgánicos, producidos por viviendas, se puede decir que de las 55.522 toneladas de RSU producidas al mes en el AMVA, 37.199 provienen del sector residencial (el 67%), y de estas, 22.319 corresponden a residuos sólidos orgánicos (el 60%), siendo esta la cantidad de residuos orgánicos aprovechables por su potencial energético, que dejarían de ser recolectados, para ser tratados en la misma fuente, como se contempla más

adelante. Las 22.319 toneladas de Residuos Sólidos Orgánicos, RSO, producidas por el sector residencial en un mes, calculándolo con los valores expuestos por Rozo en 2014, podrían ser transportados por 46,66 camiones con capacidad promedio de 5,43 Ton (realizando 2,94 viajes al día por camión), que le cuestan a los ciudadanos, aproximadamente $864.861.250 pesos al mes (tomando un costo por tonelada de $38.750 pesos), esto quiere decir, que sólo los residuos orgánicos producidos por el sector residencial, en el componente de recolección y transporte, le cuestan al AMVA, aproximadamente $10.378.335.000 pesos al año.

Este ejercicio, nos da una idea del valor que podría ahorrarse el AMVA en transporte y recolección si se aprovechara el potencial de los RSO en el mismo lugar en donde son generados (en las mismas viviendas o lugares cercanos), adicional a esto, es importante tener en cuenta, el costo del tratamiento que se le da a los residuos en el relleno sanitario, además de todas las afectaciones sociales y ambientales que esto implica, que tienen valores aún mayores, ya que comprometen la estabilidad de los ecosistemas y el medio ambiente como elemento fundamental para todos los seres vivos.

Para el año 2017, la mayoría de RSU, son dispuestos en el relleno sanitario La Pradera, como se mencionó anteriormente, pero hacia finales del siglo XX, la disposición de residuos en la ciudad de Medellín, generaron un tipo de afectaciones, entre las que se encuentran, el deterioro ambiental, social y económicos de las zonas donde se ubicaron botaderos de basuras. Más adelante, se realiza un acercamiento a una de las zonas que ha estado ligada a estas problemáticas a lo largo de su historia y ejemplifica los inconvenientes del manejo de residuos urbanos.

3.2 Emisiones y gases de efecto invernadero AMVA

El calentamiento global, registrado por diversas investigaciones desde mediados del siglo XX, tiene una de sus principales causas en la generación antropogénica de gases, en los que se observa un aumento constante, principalmente en las cantidades de CO_2, CH_4 y N2O presentes en la atmósfera.

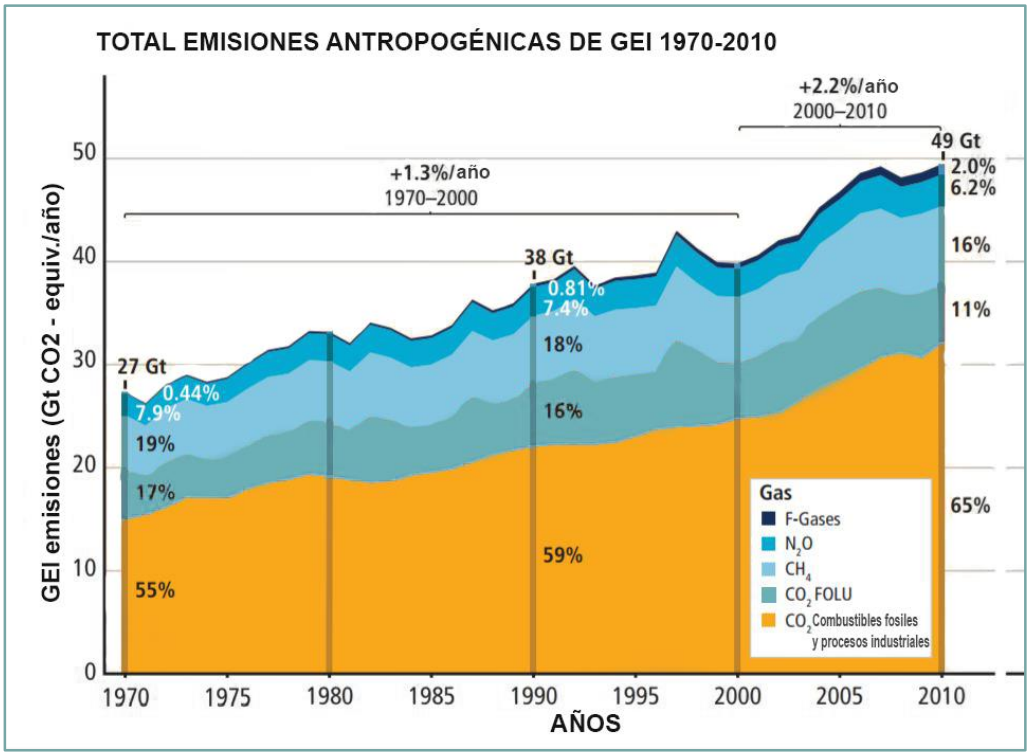


Figura 18: Total emisiones Antropogénicas de GEI 1970-2010 (IPPC, 2014)

El sector de los residuos, es el tercer contribuidor mundial de gases efecto invernadero, GEI, diferentes a CO_2. Y dentro del sector de los residuos, las dos principales fuentes de GEI son, los vertederos o rellenos sanitarios y las aguas residuales.

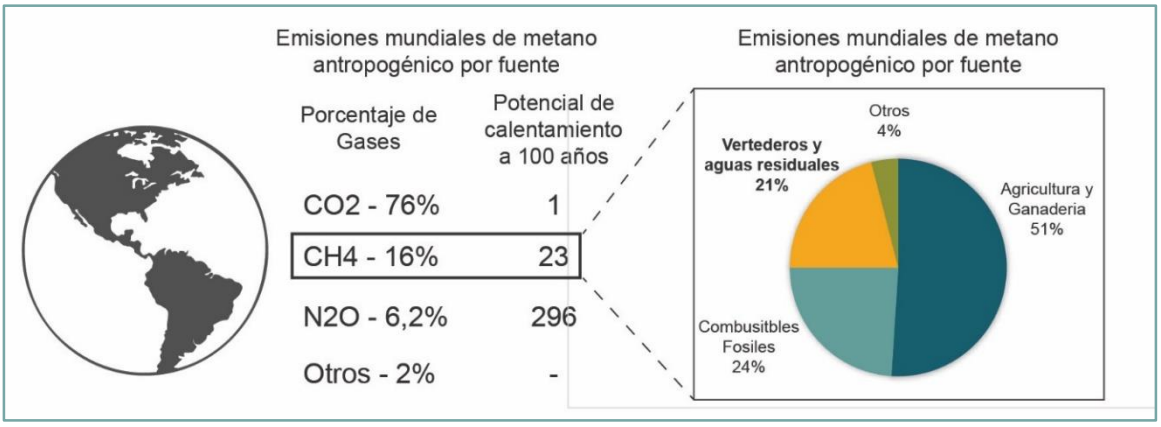


Figura 19: Emisiones mundiales CH4. Adaptado de: (Methane to Markets., 2008)

El CH_4, es el segundo gas de mayor producción antropogénica, después del CO_2 y con potencial de calentamiento 23 veces mayor al CO_2, esto quiere decir que tiene mayor eficiencia para retener el calor generado por el sol, contribuyendo al aumento de la temperatura. Esto hace que sea preferible que el metano pase por procesos de incineración, transformando sólo un porcentaje de esta en CO_2, con un potencial de calentamiento menor al CH_4, entendiendo que el ideal fuera no producir ningún tipo de GEI.

Las emisiones de GEI, constituyen una problemática importante que, en los últimos años, para el caso de generación de GEI, por fuentes móviles como vehículos, ha generado niveles de contaminación en niveles críticos, en los últimos años 2015, 2016, 2017 y 2018, hasta el punto de tener que prohibir la

Figura 20: Noticia El Tiempo marzo 2016 Fuente: http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16537773

circulación de vehículos particulares en días. Debido a esto, la atención de los medios se ha centrado en la producción de GEI por fuentes móviles, dejando un poco de lado otro tipo de fuentes generadoras de GEI.

Figura 21: El tiempo marzo 2018 Fuente: http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/alerta-roja-en-medellin-por-calidad-del-aire-190366

Según la Política Pública de Construcción Sostenible para el AMVA (2015), se estimaron las emisiones de GEI, por diferentes fuentes; estas mediciones no incluyen cantidades de CH_4, pero si atribuyen cerca de 2,26 toneladas de CO_2 a los RSO, representando un porcentaje importante del total de emisiones producidas. Pese a no contar con la cantidad de emisiones de CH_4, se puede evidenciar la cantidad de GEI generados por los RSO, que constituyen un alto porcentaje del total de emisiones del AMVA, y deberían ser considerados desde el punto de vista de generación de CH_4 con efectos igual de nocivos al CO_2.

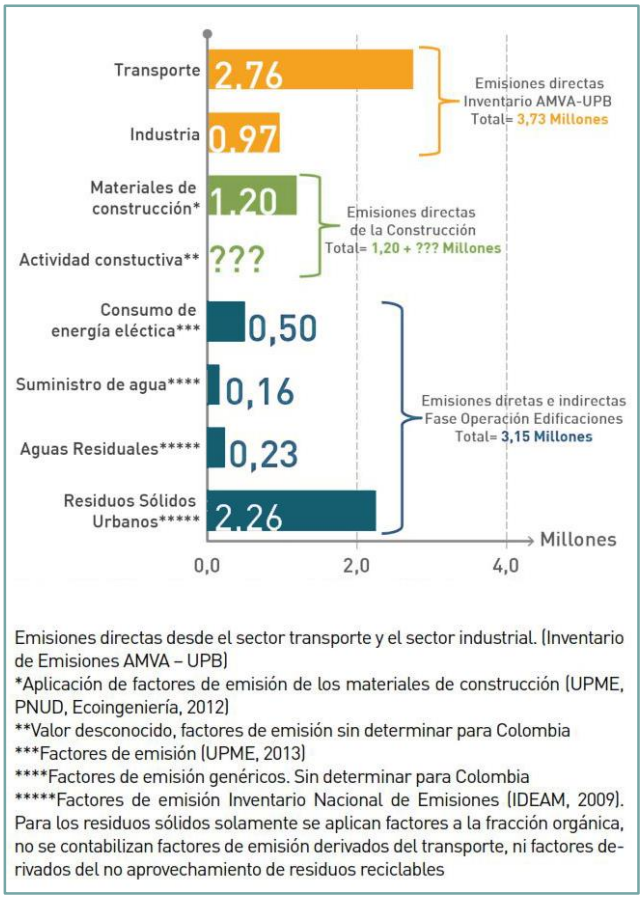


Figura 22: Estimación de emisiones de GEI en el AMVA (AMVA, 2015, pág. 117)

Para el caso del AMVA, el relleno sanitario La Pradera, cuenta con un sistema para quemar el biogás producido por los RSO, a partir de la instalación de algunas chimeneas alimentadas por tuberías enterradas a lo largo del relleno sanitario, que recolectan los gases producidos, para ser incinerados. Este tipo de iniciativas tienen como propósito, reducir las explosiones que ocurren debido a la acumulación de metano y reducir el potencial de calentamiento al liberar este tipo de gases a la atmosfera, sin embargo, garantizar que toda la cantidad de gas sea recolectada para incinerar y no se aprovecha el potencial energético presente en los gases, ya que no hay tecnologías para la generación de energía en la mayoría de rellenos sanitarios del país.

Categoría	CO_2-eq (Gg)
Disposición de residuos sólidos	22,3
Tratamiento biológico de los residuos Sólidos	0,09
Incineración abierta de residuos	1,5

Tabla 9: Emisiones del sector Residuos en CO_2 equivalentes para el año 2011. (PP. AMVA, 2015, pág. 117)

La disposición en el relleno sanitario, constituye de esta manera una alternativa incompleta, más si se tiene en cuenta que debido a la poca separación en la fuente, terminan todo tipo de residuos enterrados en el relleno La Pradera, desde reciclables, orgánicos y hasta peligrosos en algunos casos, desperdiciando por completo el potencial de reutilización y de generación de energía de algunos de estos residuos.

3.3 Barrio Moravia

Hacia los años 60, familias procedentes del campo y desplazadas por la violencia, comenzaron a ocupar de manera informal el barrio Moravia, debido a su localización estratégica cerca a la estación El Bosque del ferrocarril, a lugares de extracción de material de río y al centro de la ciudad de Medellín. En 1977 el Concejo de Medellín decide ubicar en un lote en Moravia el botadero final de basuras de la ciudad, como una medida "temporal", condición que generó insumos para la construcción de nuevas viviendas informales y que las familias subsistieran del reciclaje. "Cuando en 1984 se clausuró el botadero 17.000 personas vivían en el entorno del conocido como el Morro de Moravia y comenzaba la ocupación de sus laderas". (Montoya Restrepo, y otros, 2011)

Figura 23: Fotografía histórica de El Morro en Moravia. Jorge Melguizo Posada, 1982 (https://blogs.iadb.org/ciudadessostenibles/2014/09/30/de-un-cerro-de-basura-a-un-jardin-urbano/)

A partir del año 1987, la condición de hacinamiento debido a la cantidad de hogares establecidos sobre la montaña de basuras, conocida como el Morro, hizo que el sector fuera declarado como un problema de salud pública y se implementó el Programa Integral de Mejoramiento de Barrios Subnormales en Medellín PRIMED. Durante algunas administraciones se reubicaron familias de El Morro en otros sectores, pero en los

siguientes años, la violencia, el narcotráfico y la delincuencia hicieron que entre 1987 y el año 2000 el sector fuera abandonado por el estado, pero a pesar de ello, la densidad de habitantes aumentó de 15.000 a 42.000, según cifras de Arango Escobar de 2006.

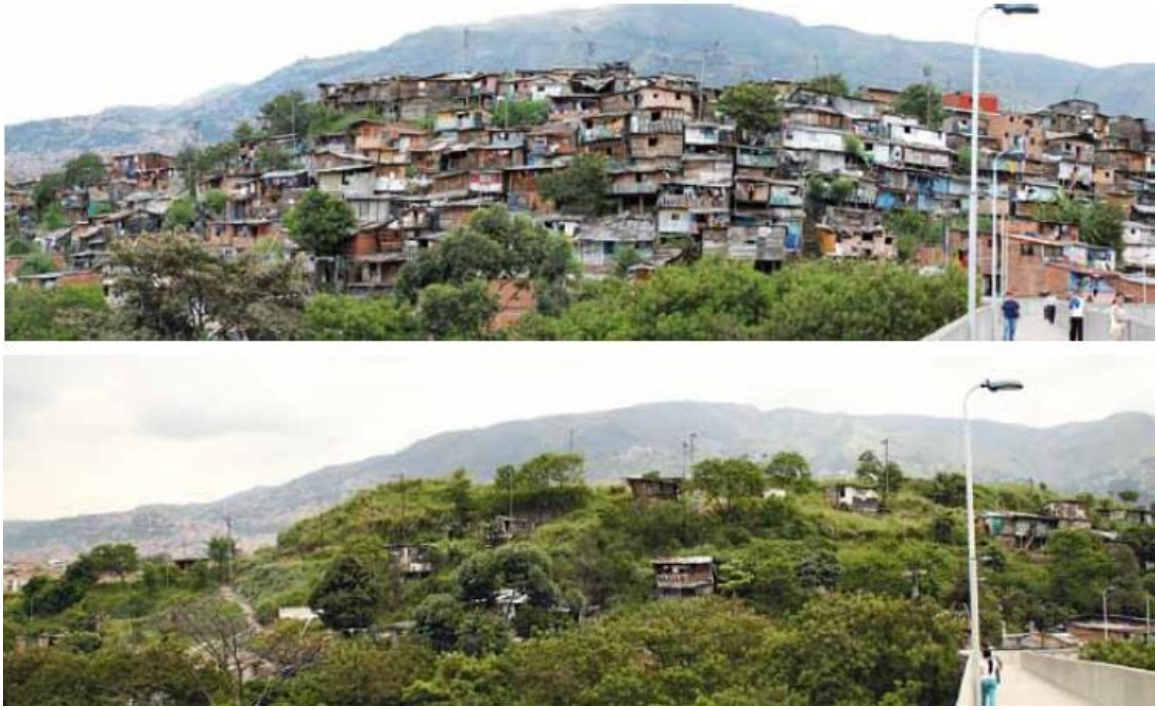


Figura 24: El Morro, antes y después. (http://unicolmayor.edu.co/publicaciones/index.php/nova/article/view/171/342)

Es sólo hasta el año 2004 que la administración desarrolla el programa: *Intervención Integral en Moravia* y con este la reubicación total de las familias asentadas sobre El Morro; según Montoya Restrepo y otros, "la inestabilidad del suelo, sus altas pendientes, la fragilidad de las construcciones, la presencia de desechos industriales, clínicos y domésticos y la continua emanación de gases tóxicos y lixiviados, hacía que los habitantes de Moravia estuvieran sometidos a un elevado riesgo químico y microbiológico". (2011) Debido las condiciones de riesgo de El Morro, la alcaldía planteó ocupar El Morro, con espacio público evitando nuevas invasiones, mediante el diseño un parque con huertas y chimeneas que permitieran la combustión de gases para evitar explosiones. Muchas de las

familias que vivían allí fueron reubicadas en sectores colindantes a El Morro, como corresponde al caso de estudio del Complejo Habitacional la Herradura.

La selección del Complejo Habitacional La Herradura, se debe a su condición de multifamiliar estrato 2, la que representa la mayoría de la población, ya que para el año 2016: el 36% de las viviendas pertenecían al estrato 2; el estrato con mayor número de suscriptores a servicios públicos como energía y saneamiento básico (recolección de residuos).

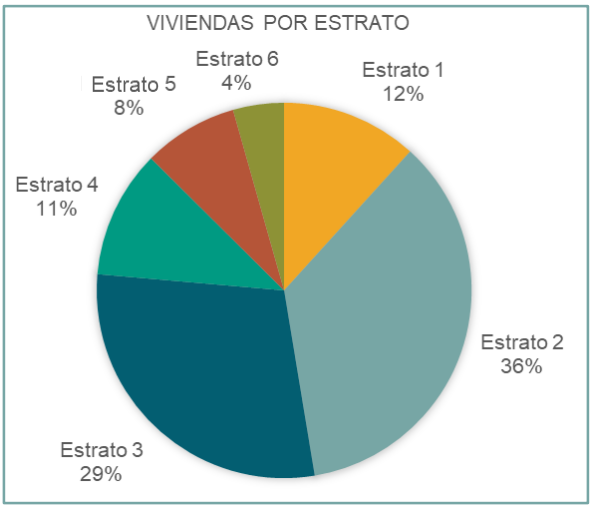


Figura 25: viviendas por estrato socioeconómico Datos de: www.medellin.gov.co, 2010

Al estar ubicado en el barrio Moravia, el caso de estudio: Complejo Habitacional La Herradura, descrito a continuación, ha tenido una historia ligada a los residuos sólidos urbanos, ya que prácticamente su población subsitió durante mucho tiempo del reciclaje de basuras.

3.4 Vivienda Multifamiliar La Herradura

Resultado del programa: "Intervención Integral en Moravia" (Alcaldía de Medellín, 2006) se crearon 180 viviendas en el Complejo Habitacional La Herradura, ubicado a escasos metros de El Morro, con el fin de reubicar a los habitantes de El Morro, que se encontraban en condición de riesgo y en donde subsistían principalmente de las basuras.

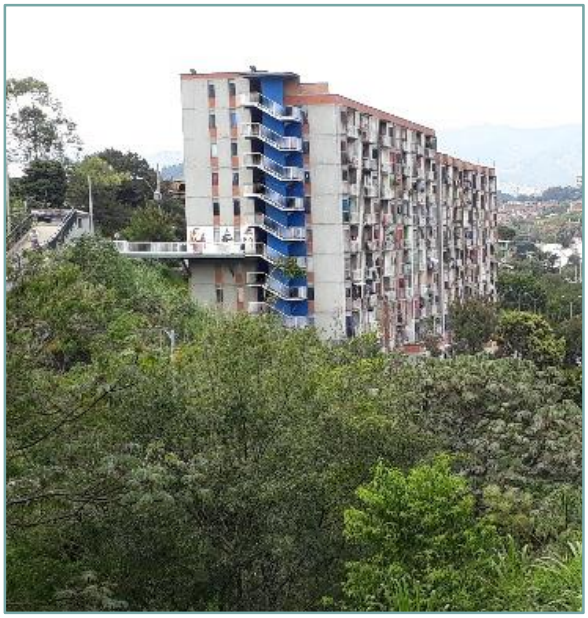


Figura 26: Complejo Habitacional La Herradura. (fotografía propia)

El complejo habitacional está ubicado sobre la carrera 62 con calle 92 a la orilla occidental del río Medellín, entre las estaciones Tricentenario y Caribe del metro, a escasos 600 metros del parque El Morro, anterior lugar de residencia de la mayoría de sus habitantes. El complejo habitacional se compone de dos bloques, cada uno de 10 pisos, para un total de 180 apartamentos estrato 2 (clasificación socio-económica para los inmuebles que determina la contribución para el pago de servicios públicos domiciliarios en Colombia). El edificio cuenta con zonas comunes de la

Figura 27: Reunión con la comunidad en La Herradura (fotografía propia)

copropiedad, como dos salones sociales y zonas verdes, responsabilidad de la administración del edificio.

Figura 28: Cuarto de basuras en La Herradura. (fotografía propia)

En cuanto a infraestructura para el manejo y recolección de residuos, el complejo cuenta con un único ducto (shuts) de basura por torre para arrojar las bolsas de basura desde todos los pisos, que llegan a un cuarto en el que se disponen unas canecas para su posterior recolección por el camión recolector. Desde el punto de vista del diseño arquitectónico y concepción del proyecto como tal, no se tuvieron en cuenta espacios adecuados para la gestión de los residuos sólidos, ni la posibilidad de espacios para el reciclaje o aprovechamiento de los mismos.

Se realizaron encuestas a la comunidad, para tener un dato actualizado de los habitantes del complejo y su posición frente a la separación de los residuos sólidos producidos en las viviendas, para su aprovechamiento.

Según las encuestas realizadas, se logró determinar que la población del complejo está compuesta principalmente por familias de 4 integrantes por hogar y una composición de 34% hombres, 35% mujeres y 31% niños menores de 12 años. Esta población de estrato 2

se caracteriza por su bajo nivel educativo y sus bajos ingresos; según estadísticas tomadas del libro; *Separados y Desiguales: Educación y clases sociales en Colombia* (García, Espinosa, Jiménez, & Parra, 2013), sólo el 4,31% de los padres y madres de hogares estrato 1 tienen educación profesional o técnica completa, mientras que para estratos 6, el porcentaje corresponde al 82%.

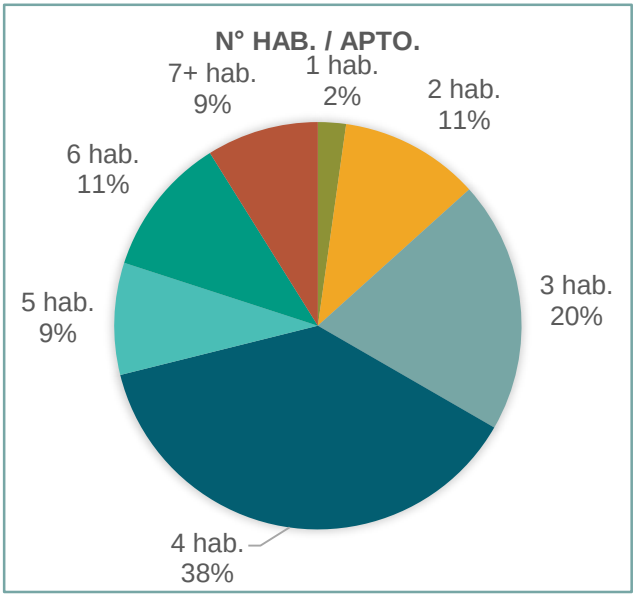


Figura 29: Número de habitantes por hogar en La Herradura (elaboración propia a partir de encuestas)

"La brecha en el desempeño escolar entre estudiantes ricos y estudiantes pobres se confirma, si comparamos los resultados de la prueba frente al ingreso familiar que autorreportan los individuos en las bases de datos del Icfes" (Ibíd., 2013, pág 48). Los hogares de estratos bajos, se encuentran en una condición desfavorable, debido a sus bajos ingresos económicos, en relación a

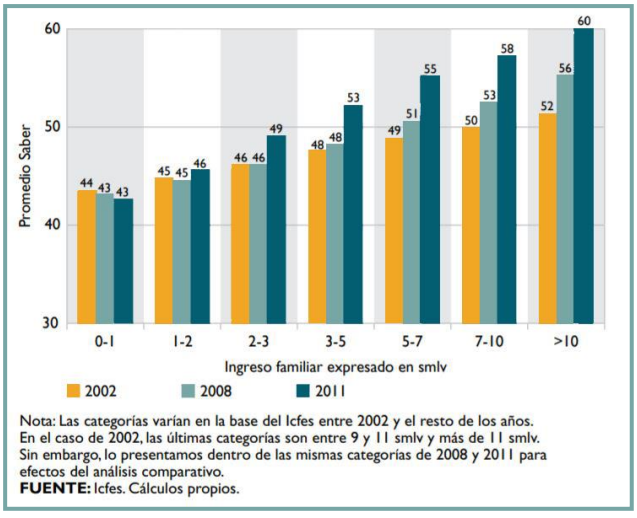


Figura 30: Promedio de las Pruebas Saber según nivel de ingreso familiar.
(García, Espinosa, Jimenez, & Parra, 2013, pág. 48)

estratos más altos, aspecto que se ve reflejado en la calidad de vida y el nivel educativo, como se mencionó anteriormente.

Los hogares estrato 2 en el AMVA, destinan aproximadamente un 14% de sus ingresos para el pago de servicios públicos domiciliarios, según estadísticas de la Política Pública para el AMVA para el 2015, esto en relación a el 8% que destinan hogares estrato 6 para el mismo fin; y para el caso de Bogotá, se tiene que las viviendas estrato 1 gastan el 11% de sus ingresos en relación al 5% destinado por viviendas estrato 6, para el pago de servicios (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2004); estos indicadores demuestran la inequidad del sistema de servicios públicos en relación a los ingresos de los hogares, pese a que la mayoría de estos son subsidiados según la Ley 142 de 1994.

Las estadísticas citadas anteriormente indican que el valor del pago de servicios públicos representa un alto porcentaje de los ingresos del hogar, que podrían emplearse en mejorar las condiciones de educación y de calidad de vida de las personas.

Y es debido a estas condiciones particulares de la población de estratos bajos, los altos costos de la energía y alta cantidad de residuos orgánicos producidos, que toma pertinencia para ser el caso de estudio de la investigación, que busca implementar alternativas que beneficien a los más necesitados y puedan replicarse en otros escenarios.

4. CAPÍTULO IV: LOS RESIDUOS EN LA VIVIENDA

En todo el mundo, el sector residencial es responsable de más de la mitad de los RSU, genera aproximadamente el 67% del total de los residuos (AMVA, 2015), muchos más que las industrias y el transporte juntos. Esta condición se hace más desfavorable en grandes ciudades y centros urbanos en donde el aumento de la población hace que el manejo de RSU sea un aspecto crítico para el metabolismo urbano.

La mayoría de residuos producidos, corresponde a residuos orgánicos, bastante heterogéneos, condición que dificulta obtener una caracterización exacta sobre su composición y a su vez complejiza la replicabilidad de los experimentos realizados con este tipo de material. A pesar de esto, según varias investigaciones sobre caracterización de RSO recopiladas por Campuzano y Gonzales (2016), se encontraron diferencias significativas en cuanto a la composición de los residuos orgánicos producidos en diferentes países, sin embargo, la caracterización de residuos entre ciudades de un mismo país arrojó resultados similares.

Esto se podría deber, a que, en regiones homogéneas, con el mismo clima, tradiciones y culturas similares, la producción y consumo de frutas, verduras y otros alimentos, hacen que, por ejemplo, en un mismo país, o en una región como Suramérica, la composición de RSO pueda tener cierta similitud, como lo son el consumo de papa, frutas tropicales, etc.

Esta condición, si bien establece que los RSO puedan tener ciertas características similares, útiles para determinar variables importantes como: contenido de Sólidos volátiles, densidad y PH, no garantiza su homogeneidad, debido a que la composición de residuos es totalmente impredecible, al estar directamente relacionada a conductas humanas, poder adquisitivo, gustos, temporadas y un inúmero de variables que hacen que dos muestras tomadas en el mismo hogar, puedan tener variaciones considerables.

De allí la importancia de comprender que a pesar de la heterogeneidad de los residuos y que cada muestra tomada puede variar considerablemente, la composición de los residuos en términos generales para un país, en donde los hábitos alimenticios y las tradiciones son semejantes, los residuos presentan una composición similar.

Para el AMVA, la producción de RSU por persona está calculada a partir de la producción per-cápita (PPC), en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, en 0,45kg por habitante/día, lo que significa que una sola persona al año podría generar aproximadamente 164,25kg de basura. Esta cantidad de basura se traduce en un total de 46.093,11 Ton/mes de RSU para el AMVA y está conformada en su mayoría por residuos orgánicos (residuos de frutas, verduras, restos de comida y residuos de poda).

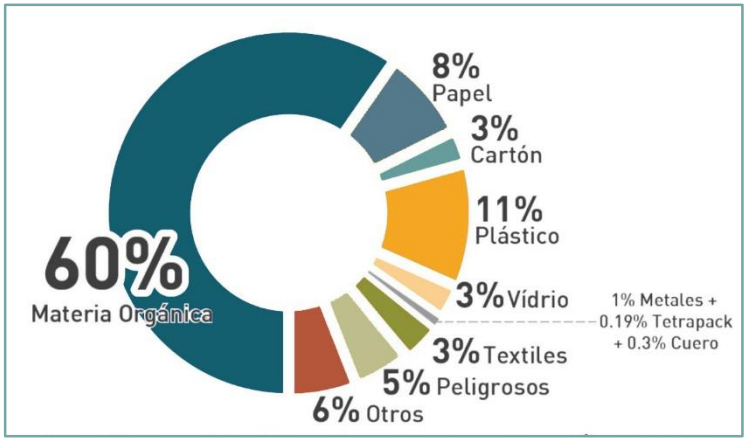


Figura 31: Composición de RSO generados en el AMVA. (AMVA, 2015, pág. 123)

La mayor parte de la población no separa estos residuos, motivo que dificulta el aprovechamiento de los mismos. Esto se debe a que desde el gobierno y la administración no existen suficientes incentivos para que las empresas prestadoras del servicio de aseo y los habitantes en general, vean la separación de los residuos como algo benéfico para ellos, a pesar que existen algunas normas y guías en cuanto al adecuado manejo de los residuos sólidos.

Para el caso de Colombia existe el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), que fija los requisitos técnicos para los prestadores de servicios públicos. El título F del presente reglamento, hace referencia a los sistemas de aseo urbanos, desde el almacenamiento, separación, recolección, transporte, aprovechamiento y disposición final, estableciendo criterios básicos que garanticen la integralidad en el manejo de RSU.

En el RAS, se mencionan unos esquemas de clasificación para aplicar en todos los sistemas de Aseo Urbano, entre los que se encuentran:

1. Clasificación según composición física
2. Clasificación según la procedencia de los residuos
   (Residencial, comercial, institucional, Hospitalario, de barrido y de escombros).
3. Clasificación según la factibilidad de manejo, aprovechamiento y disposición
   (Ordinarios y Especiales)
4. Clasificación según su grado de peligrosidad. (Peligrosos y no peligrosos)

Para los RSU, la clasificación que permitiría el mejor aprovechamiento de los residuos, sería según su composición física, teniendo en cuenta que hace falta incluir residuos

peligrosos o de riesgo biológico. La clasificación según composición física del Título F1.4.2.1, se realiza bajo el siguiente esquema:

- Residuos orgánicos crudos, residuos de poda, corte de césped y jardinería
- Productos de papel y productos de cartón
- Plásticos
- Textiles
- Metales ferrosos, compuestos de aluminio y otros metales no ferrosos
- Vidrio
- Madera, caucho (goma), cuero, ceniza, rocas y escombros, huesos y otros

Pese a que el reglamento RAS, establece estos criterios básicos para la clasificación de residuos, en Colombia no es común que las personas tengan el hábito de separar las basuras; de los 11,6 millones de toneladas de basura generadas al año en Colombia, solo aprovecha un 17 por ciento, según Rojas, en un artículo publicado para el período El Colombiano (2016). No hay estímulos por parte del gobierno, ni reglamentación para la separación de los residuos, en cambio, es más fácil para las empresas de aseo, enterrar la totalidad de los residuos en rellenos sanitarios, con los costos económicos y ambientales que esto implica.

Desde el punto de vista de los hogares, tampoco hay mucha educación al respecto, ni conocimientos sobre los beneficios que se pudieran obtener del aprovechamiento de residuos. En general en la población se observa poco conocimiento de las afectaciones que genera la disposición final de los RSU en los rellenos sanitarios.

Adicional a esto, desde la Política Pública se involucra a este tipo de problemáticas, el papel de la concepción de las edificaciones: “El problema menos evidente pero fundamental, es el desconocimiento existente desde el diseño arquitectónico de las edificaciones, que no incluyen los espacios adecuados que le permitan gestionar los residuos sólidos a los usuarios” (Area Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015, pág. 125)**.**

Una problemática de este tipo, repercute en el metabolismo urbano, al dejar desprovistos de espacios adecuados a la mayoría de edificaciones, y por lo tanto contribuye a una cultura en la que no son separados los residuos; la problemática de la gestión de los residuos se ve reflejada desde aspectos tan sencillos como la concepción de las edificaciones, hasta aspectos a nivel de ciudad, como la recolección y tratamiento de RSO, por lo que es indispensable desde la arquitectura, aportar alternativas que tengan en cuenta soluciones holísticas, para la separación de residuos sólidos que generan beneficios tanto para los usuarios y generadores de residuos, como para el metabolismo de la ciudad y su relación con el medio ambiente.

4.1 Residuos en el Complejo Habitacional La Herradura

Para el caso de estudio: Complejo Habitacional la Herradura, se realizó un acercamiento a la comunidad, en donde se realizaron encuestas de percepción con los habitantes y mediciones que permitieron monitorear la producción de residuos orgánicos, para evaluar su posible aprovechamiento.

Figura 32: Campaña para la separación de RSO en La Herradura (fotografía propia)

A partir de las encuestas realizadas a los 180 apartamentos del complejo, se encontró que el 48% separa la basura actualmente, a pesar que no hay puntos de acopio para cada tipo de residuos. La mayoría de hogares separa la basura en dos bolsas: una con residuos orgánicos y otra con el resto de residuos. Las dos bolsas son arrojadas por el ducto de recolección de basuras del edificio y llegan al cuarto de basuras, en donde las personas encargadas de la limpieza del edificio abren algunas bolsas y seleccionan manualmente botellas de plástico y cartones que venden para obtener algo de dinero a cambio. Esta práctica es por iniciativa propia, para obtener una remuneración adicional al salario por el aseo del complejo habitacional. Pese a que un porcentaje de los habitantes separa la basura, como se mencionó anteriormente, la empresa de aseo dispone la totalidad de residuos en el relleno sanitario

La Pradera y no incentiva la separación, el reciclaje ni el aprovechamiento de ningún tipo de residuo.

Adicional a las encuestas, se realizaron charlas informativas con toda la comunidad para iniciar un programa de separación de residuos, la clasificación de residuos, como se mencionó para términos prácticos de la investigación, no tomó las 7 categorías, sino que se simplificó para determinar la cantidad de residuos orgánicos (residuos con potencial energético). En estas charlas se explicaron los beneficios de aprovechar los residuos orgánicos mediante métodos como el compostaje y la digestión anaerobia para la producción de biogás. Se entregaron dos bolsas por apartamento: una de color verde para arrojar los residuos orgánicos y otra negra para el resto de residuos, con el fin de poder medir la producción de residuos orgánicos y obtener muestras para analizar su potencial energético.

4.2 Caracterización de residuos

Figura 33: Bolsas de RSO recolectadas en La Herradura (fotografía propia)

De las bolsas pesadas: 36 bolsas, correspondientes al 20% del total de la población del complejo habitacional, se seleccionaron 5 bolsas de basura de apartamentos diferentes al azar, para realizar los posteriores análisis en el laboratorio. Los pesos de las bolsas fueron de: 0,88kg, 1,63kg, 1,09kg, 1,18kg y 3,55kg respectivamente. El contenido de las bolsas se esparció sobre un plástico, para registrar su contenido individualmente y posteriormente ser mezcladas para obtener una mezcla homogénea. A continuación, se observa el contenido de las diferentes bolsas:

De las muestras obtenidas se identificaron los siguientes alimentos:

Cítricos, plátano, mango, maracuyá, aguacate, tomate de árbol, tomate, cebolla, papa común, papa criolla, vainas de arvejas, apio, arroz cocido, pasta cocida, cáscaras de huevos y restos de carne, con algunos huesos (estos últimos fueron retirados para evitar problemas con el posterior triturado de la muestra). Estos alimentos encontrados en los RSO, son propios de la región y son alimentos de consumo masivo para la mayoría de la población.

Figura 34: Muestras de residuos orgánicos obtenidos de La Herradura (fotografía propia)

El pH de los residuos procesados, fue de 4,4, un pH considerablemente ácido, que no se encuentra dentro de las recomendaciones para el proceso de DA, motivo por el cual se previó para los ensayos de laboratorio el control de esta variable.

Según estadísticas del PGIRS (2006), la producción de residuos por habitantes de estratos 2, 3 y 4 es aproximadamente de 0,45 Kg/hab./día, del que 0,27 kg corresponden a RSO (el 60%), que para el caso de estudio, con 180 apartamentos y un promedio de 4 habitantes por apartamento (según la encuesta realizada en el sitio), da como resultado, 5.832 Kg de RSO producidos al mes en el Complejo Habitacional La Herradura y con posibilidad de ser aprovechados.

Figura 35: resumen producción RSO en La Herradura (elaboración propia)

5. CAPÍTULO V: POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

La fracción orgánica de los residuos generados en las ciudades, está compuesta principalmente por restos de alimentos procesados (arroz, carne, pasta, etc.), frutas, verduras, restos de jardinería; y representan para el caso del AMVA más del 55% del total de RSU (PGIRS AMVA, 2006). Estos residuos son altamente heterogéneos, debido a que depende de los hábitos de consumo de los individuos que la generan y muchas otras variables que hacen que, al comparar dos muestras procedentes de la misma fuente o individuo, puedan presentar diferencias significativas.

A pesar de la variabilidad en su composición, los residuos producidos a una escala de región, pueden tener una composición con ciertas características particulares, debido a que los hábitos de consumo de una población están directamente relacionados a la disponibilidad de productos en la región que pueden no variar mucho a esta escala.

Por ejemplo, para el caso de Colombia y más específico de la región del Valle de Aburrá, los hábitos de consumos de alimentos son similares a lo largo del territorio y pueden generar en la mayoría de casos, residuos con unas características que, sin ser constantes, tienen cierto grado de similitud. Esto puede verse reflejado en un alto consumo de frutas propias del trópico, arroz y papa, a diferencia de países asiáticos que podrían generar residuos con altos contenidos de pescados y raíces (solo para mencionar un sencillo ejemplo).

Según varios estudios, recopilados por Campuzano y Gonzáles en 2016, se obtuvo el promedio de composición elemental a partir de varias muestras de residuos de alimentos, en investigaciones alrededor del mundo con los siguienetes porcentajes:

- 46.6% ± 4.4 Carbono (C)
- 6.6% ± 0.62 Hidrógeno (H)
- 2.9% ± 0.6 Nitrógeno (N)
- 0.3% ± 0.26 Azufre (S)
- 35% ± Oxigeno (O) *para frutas y verduras* (Cadavid & Bolaños, 2015)
- 8,6% ± Cenizas y otros

Estos elementos obtenidos en la composición elemental, se encuentran en los alimentos, restos de frutas y verduras en forma de carbohidratos, lípidos y proteínas, los cuales, a partir de la DA y su descomposición, son transformados en elementos sencillos, como azucares, alcoholes y ácidos que más adelante son transformados hasta producir Biogás, con contenidos de Metano (CH_4) y Dióxido de Carbono (CO_2) principalmente.

El CH_4 está catalogado dentro de los principales gases de efecto invernadero (GEI), el segundo en producción por el hombre después del CO_2, pero más potente, debido a su mayor eficacia para concentrar la energía proveniente del sol, aproximadamente 23 veces mayor a la del CO_2. (Methane to Markets, 2008)

El CH_4 es un hidrocarburo altamente inflamable, con alto contenido energético, características que permiten que en el biogás sea utilizado como combustible en diversas aplicaciones. En el caso del Biogás, el contenido de CH_4 puede variar entre el 55 y 70%, dependiendo de la composición de los residuos y el tipo de proceso utilizado para la DA.

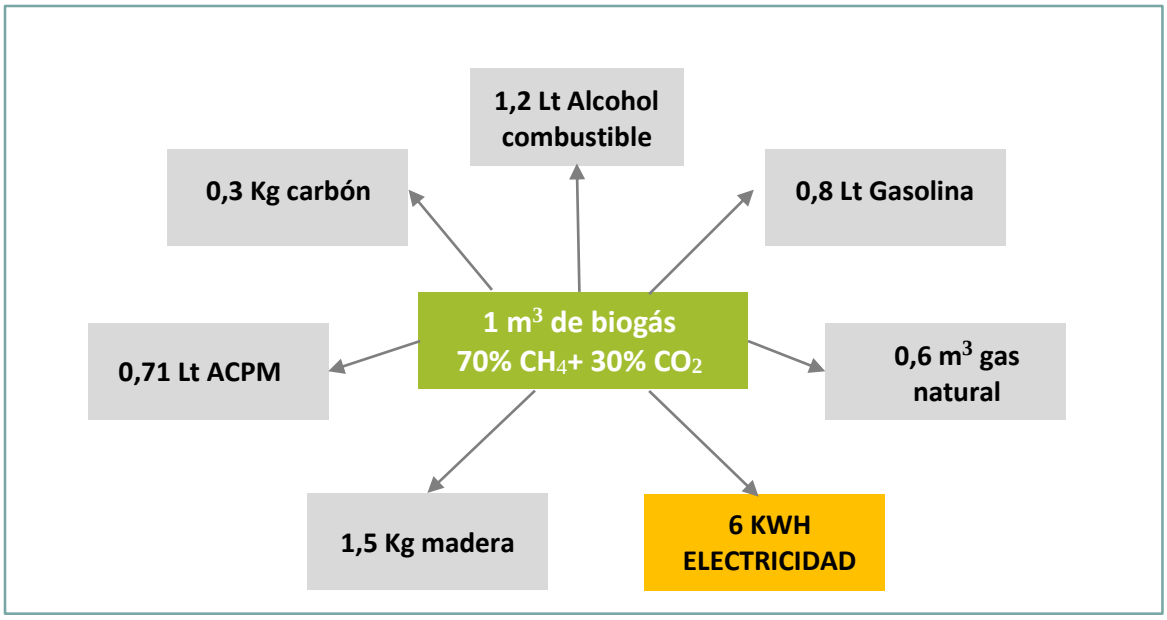


Figura 36: Potencial energético del Biogás. Fuente: adaptado de http:/www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf

El potencial energético del biogás presente en los RSO, se estima en 6 KWH/ m^3 de biogás, esto quiere decir que 1 m^3 de biogás alcanzaría para mantener encendido un bombillo led de 8w, durante 111 horas.

Es a partir de estas características del CH_4 presentes en un alto porcentaje en el biogás, que se puede determinar el potencial energético de los RSO, mediante su descomposición a través de la DA, y obtener una cantidad determinada de biogás en m^3, las que posteriormente se trasformaran a cualquier tipo de energía; para el caso de la presente investigación energía eléctrica en KWH (kilo vatios-hora).

Actualmente existen varios sistemas para llevar a cabo la digestión anaerobia, entre los que se encuentran según su modo de operar: reactores tipo Batch, de flujo continuo, reactores de flujo ascendente (RAFA), reactores de lecho flotativo, de lecho fluidizado, entre otros. Cada sistema tiene sus ventajas y desventajas dependiendo del tipo de residuo, y pueden presentar múltiples variaciones, según el tipo de variables que intervienen antes y durante el proceso. Los sistemas de lecho flotativo y RAFA son sistemas que requieren recirculación, mediante equipos externos y un control minucioso de gran cantidad de variables (Fagbohungbe, y otros, 2015) (Vandevivere y otros, 2002) (California Environmental Protection Agency, 2008); debido a esto, para determinar el potencial de producción de metano teórico, sin la necesidad de involucrar gran cantidad de variables en el proceso, se han desarrollado múltiples investigaciones que emplean reactores tipo Batch, a partir de tecnologías relativamente básicas, con altos tiempos de retención, que permiten desarrollar un montaje a escala de laboratorio para determinar el potencial para biogás, a partir de una muestra de RSO.

Los reactores tipo Batch o de lecho fijo, son esencialmente, recipientes cerrados, sin flujo de entrada ni de salida, que garantizan la ausencia de oxígeno para que los organismos anaerobios puedan llevar a cabo la descomposición del material orgánico y su posterior transformación en Biogás, estos recipientes usualmente son empleados sólo a escala de laboratorio, debido a las complicaciones que tendría su aplicación a escala real, por la interrupción del proceso al ingresar nuevo material al reactor, que permitiría el ingreso de aire que tendría efectos directos sobre el proceso anaerobio, además de los largos tiempos que requiere el iniciar el proceso de digestión y alcanzar las variables adecuadas para este.

5.1 Materiales y Métodos

En este capítulo se exponen los materiales y métodos empleados para el experimento de laboratorio, previo al capítulo de resultados, en donde se profundizará en los valores obtenidos para producción de biogás y demás variables.

Los RSO, fueron obtenidos con los procedimientos mencionados anteriormente en el capítulo 4 del Complejo Habitacional la Herradura, fueron refrigerados a 4°C y posteriormente llevados al laboratorio, en donde se prepararon reactores tipo Batch de 500 ml.

Los reactores se prepararon en recipientes de vidrio de 500 ml, a los cuales se les agregó una mezcla de 400 ml de agua, sustrato (RSO) e inóculo y 100 ml libres para producción de gas. Antes de realizar el experimento, se generaron se realizaron 3 grupos de reactores: el grupo A, con una proporción 1:3:0,2 de sustrato agua e inóculo; el grupo B sólo con sustrato y agua relación 1:3; y el grupo C, reactores unicamente con 400 ml de inóculo. Este último grupo fue descartado a los 5 días de prueba, debido a que no presentó cambios visibles, ni generación de biogás. A los grupos de reactores A y B, se le realizaron mediciones de pH, temperatura y volumen de producción de biogás durante 30 días (a partir de ese periodo se dejaron de percibir cambios significativos en los reactores). El control del Ph para los grupos A y B, se realizó, con bicarbonato de sodio (NaHCO3) al 99% de pureza, agregando la cantidad necesaria para alcanzar un pH cercano a 7,2; esta variable se explica más adelante.

A partir del ejercicio preliminar, se desarrolló el experimento final, con los grupos A y B, cada uno con 3 réplicas durante un periodo de 38 días, cuyos resultados se exponen en el siguiente capítulo.

Las proporciones de los grupos A y B se obtuvieron a partir del estudio del estado del arte mencionado en el capítulo 2, en donde a partir de varias investigaciones, se determinaron los valores ideales para el ejercicio.

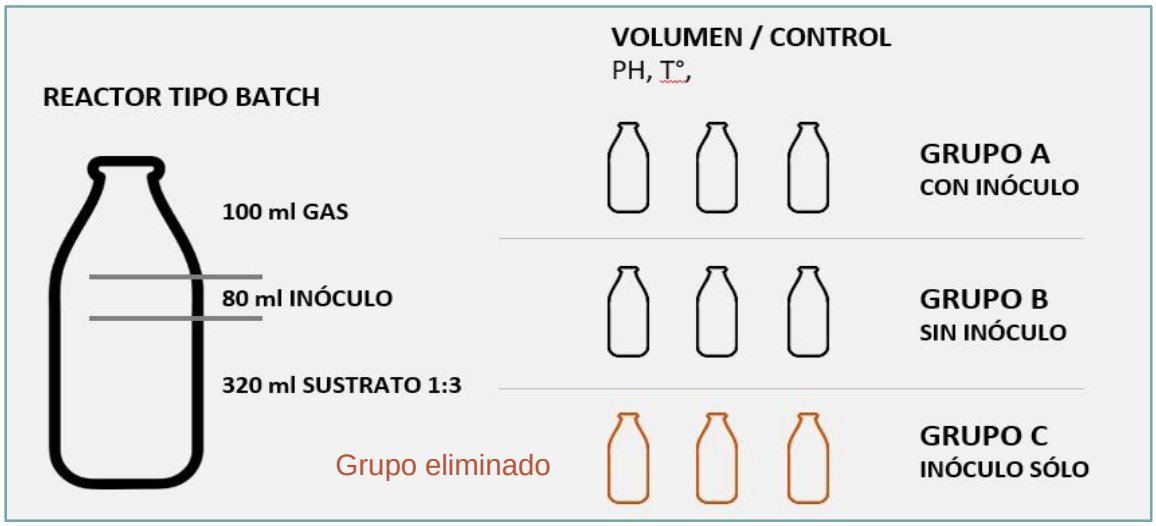


Figura 37: Grupos de reactores elaborados en el laboratorio (elaboración propia)

Las variables se definieron según la revisión del estado del arte, desarrollada en el capítulo 2, en donde se evaluaron las condiciones más favorables y las condiciones que estuvieran al alcance de la investigación; para el caso de temperatura, tamaño de partícula y niveles de luz, se trabajó con las condiciones disponibles en el laboratorio, entendiendo que, al aplicar el ejercicio a escala real, estas variables podrían variar para cada caso particular y podrían ser de difícil control.

VARIABLES DIGESTIÓN ANAEROBIA / según E. del Arte						
TEMPERATURA (H. Gerardi, 2003, pág. 90)		**PH** (H. Gerardi, 2003, pág. 101) (Min. Energía Chile, 2011)		**TAMAÑO DE PARTICULA** (Nalinga & Legonda, 2016) (Castro, Guzmán & Escalante, 2012)		**NIVELES LUZ** (Uyaszewski y otros, 1997)
°C	**PROD. CH4**	**PH**	**PROD. CH4**	**TAMAÑO PARTICULA - mm**	**PRODUCCIÓN %CH4**	**Luxes**
≥ 35	Optima	**7,0 - 7,2**	Optima	**>5 mm**	70%	No reporta
32 - 34	Favorable	7,3 - 8	Favorable	5 mm	66%	inhibición en levaduras>
21 - 31	Favorable	6,0 - 6,9	Favorable	25 mm	55%	3,200 lx
< 21	Poco Favorable	< 6,0 / >8,0	Poco Favorable			

Tabla 10: Variables de entrada para reactores tipo Batch. Elaboración a partir de autores.

Inóculo

- El inóculo se obtuvo de un reactor en funcionamiento, en una granja de cerdos, ubicada de la vereda la Violeta, Municipio de Chinchiná, Caldas. El inóculo fue almacenado durante dos semanas, a temperatura ambiente, se adicionó al final de la mezcla después de la reducción de tamaño de partícula y se mezcló de manera manual. Esta relación se obtiene a partir de la revisión realizada en el capítulo II. El pH del inóculo fue de 7,2.

Sustrato

- El sustrato empleado, como se mencionó anteriormente, fue una muestra de RSO, con una medición de pH inicial de 4,4 y composición de sólidos volátiles (SV) de 59%, de acuerdo a la literatura, para este tipo de residuos. Los RSO, fueron licuados con agua, según la proporción de la mezcla, para reducir el tamaño de partícula.

Temperatura

- La temperatura utilizada fue la temperatura ambiente, que se mantuvo entre 22ºC a 26ºC; temperaturas más elevadas, hubieran permitido reducir el tiempo de retención hidráulico (TRH), pero para el caso de aplicación, requeriría de sistemas adicionales, que podrían significar costos de inversión y funcionamiento adicionales, lo que no fue contemplado dentro del experimento. La temperatura fue tomada con un termopar tipo K marca Fluke 50 Serie II, con sonda de penetración de 4mm de diámetro.

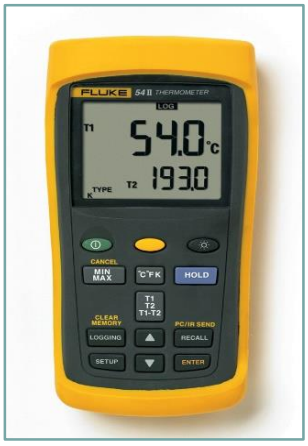


Figura 38: Figure 2; termopar tipo K marca Fluke 50 Serie II. https://www.seisa.com.co/catalogo-equipos/fluke-industrial/termometros-ir-contacto-ir-visuales/fluke-50-serie-ii/

PH

- El pH se reguló adicionando a la mezcla bicarbonato de sodio (NaHCO3) al 99% de pureza, con pH 8,6, suministrado por la empresa ProtoKimica. Las mediciones de pH, se realizaron con un medidor de pH marca Xcellent Global S-HG076, con ATC (compensación automática de temperatura), rango de medición de 0,00 a 14,00.

Figura 39: Medidor PH S-HG076 (fotografía propia)

Medición de bicarbonato

- Para medir la cantidad de bicarbonato, se utilizó una balanza electrónica marca Shimadzu TX323L. La cantidad de bicarbonato se determinó a través de tanteo, cada vez que se adicionaba una cantidad, se verificaba el nivel de pH alcanzado, hasta llegar a los valores deseados.

Figura 40: Balanza electrónica Shimadzu TX323L. (fotografía propia)

Tamaño de partícula

- El tamaño de partícula, se obtuvo preparando la mezcla en una licuadora, hasta obtener el tamaño mínimo permitido por este proceso, de tal forma que pudiera obtenerse cierta homogeneidad de la mezcla de sustrato, mayor superficie de contacto y por ende reducción del TRH. Esta variable al estar supeditada a la disponibilidad de herramientas según el lugar de aplicación del proceso, tuvo como objetivo, reducir el tamaño del sustrato para garantizar que ingresara a los reactores, con tamaños aproximados de 5 mm, sin embargo, es una variable que puede variar significativamente al momento de implementar el proceso a escala real.

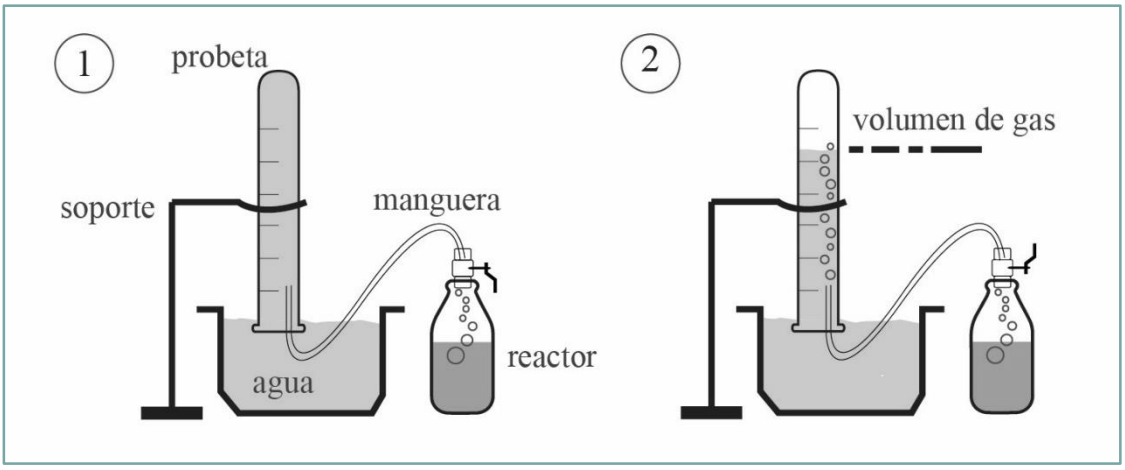
Niveles de Luz

- Los niveles de luz no fueron tenidos en cuenta en el experimento, debido a la falta de reportes en el estado del arte, se ubicaron dentro de neveras de poliestireno expandido (icopor), de manera que no recibieran la luz directa, y en el espacio de trabajo, con una iluminación artificial no mayor a 400 luxes; sin embargo, se recomienda que esta variable sea objeto de estudio en próximas investigaciones, debido al vacío existente en el estado del arte.

Volumen de biogás

- La medición del volumen de gas se realizó con el método de desplazamiento de agua, utilizando un recipiente con agua y una probeta invertida llena de agua, a la que se conectaron cada uno de los reactores, por medio de una manguera, y una llave que permitiera controlar el paso del gas. Cada reactor tuvo 2 réplicas (3 reactores en total por grupo), de manera que, si uno presentaba un valor anómalo, pudiera compararse con otro reactor de las mimas características y descartar así, cualquier inconsistencia en los resultados obtenidos.

Figura 41: Medición volumen de gas en laboratorio (fotografía propia)



1. Se conecta la válvula del reactor con una manguera y se prepara un recipiente con agua, y una probeta parcialmente sumergida, también llena de agua.
2. Se abre la válvula del reactor que permite que el volumen de biogás del reactor ingrese a la probeta, desplazando hacia abajo la cantidad de agua aproximada a la cantidad de gas producida.

Figura 42: Método de medición de volumen de gas por desplazamiento de agua. (elaboración propia)

Los resultados obtenidos de volumen de biogás se tabularon y fueron comparados con investigaciones similares; y a partir del volumen obtenido se realizó la conversión teórica del biogás obtenido a energía eléctrica, según la eficiencia de los sistemas utilizados. El comparar el volumen de biogás obtenido con otras investigaciones, es posible validar en cierta manera la posibilidad de obtener una cantidad similar de biogás, a partir de los sustratos e inóculos utilizados, teniendo en cuenta que son cálculos proyectados que podrían tener variaciones importantes, de acuerdo a las variables utilizadas y a las condiciones propias de cada caso particular.

5.2 Resultados

Los volúmenes obtenidos de biogás, están dentro del rango de investigaciones realizadas para RSO, sin llegar a estar dentro del grupo de los valores más altos alcanzados. Se obtuvo un valor de 0,205 m^3 de biogás / Kg RSO, para los reactores del grupo A (sustrato + inóculo) y un valor de 0,147 m^3 / Kg RSO para los reactores del grupo B (solo sustrato).

En la siguiente tabla se puede observar la producción de biogás obtenida, en comparación con otras investigaciones:

SUSTRATO	INOCULO	RENDIMIENTO ml biogás / g RSO	TEMP.	DURACIÓN	LUGAR	AUTOR
RSO	Lodos biodigestor granja de cerdos	205	24°C	38 días	Medellín - Colombia	Experimento Realizado
Residuos de alimentos	Lodos UASB / de relleno sanitario	157,97	37°C	30 días	Manizales - Colombia	(Pacheco Gonzáles, 2016)
RSO	Lodos UASB / de relleno sanitario	298 - 593	55°C	50 días	Malmö - Suecia	(Davidsson, Gruvberger, H.Christensen, Hansen, & Jansen, 2007)
RSO	Rumen de vaca	200 - 220	35°C	46 días	Gainesville, FL - USA	(Chynoweth, Turick, Owens, Jerger, & Peck, 1993)
RSO	Lecho de MSW	160 - 250	38° C	20 - 40 días	Brisbane - Australia	(Nopharatanaab, Pullammanappallilac, & Clarke, 2007)
RSO	Lodos de PTAR	186 - 222	35°C	60 días	Gainesville, FL - USA	(Owens & Chynoweth, 1993)
Frutas y Verduras	Lodos de PTAR	710	37°C	60 días	Palmira - Colombia	(Cadavid & Bolaños, 2015)
Frutas y Verduras	Lodos biodigestor granja de cerdos	450	35°C	27 días	Cagliari - Italia	(Scano, y otros, 2014)
* UASB: Reactor de flujo ascendente						
* MSW: municpal solid waste						
* PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales						

Tabla 11: Resultados de producción de CH_4 en otras investigaciones.

Los resultados obtenidos, en comparación a otras investigaciones, fue satisfactorio, alcanzando valores dentro del promedio obtenido por investigaciones similares, motivo por

el cual, se utiliza el potencial obtenido de 0,205 m^3 de biogás / Kg RSO como un valor válido para realizar las proyecciones de transformación en energía eléctrica que se desarrolló en los siguientes capítulos.

En el tiempo en el que se desarrolló el experimento, se observaron cambios en las variables propios de procesos de DA, reportados en el estado del arte, como la reducción del pH, generación de espuma, sedimentación y otra serie de cambios que fueron controlados a partir de ensayos previos en los que se determinó la cantidad de NaHCO3, para ajustar el pH, como realizar las mediciones del biogás, etc. Algunas de estas variables se explican en detalle más adelante.

Durante los primeros 5 días se observaron los picos de producción de biogás en todos los reactores, con mediciones máximas para los reactores del grupo A (con inóculo) de 1.120 ml durante el día 2, continuando con una producción significativa hasta el día 12, en donde desde el día 7 se vio una disminución constante en la producción, hasta el día 28.

Para los reactores del grupo B (solo sustrato), se observó un comportamiento similar, con una producción menor a las del grupo A.

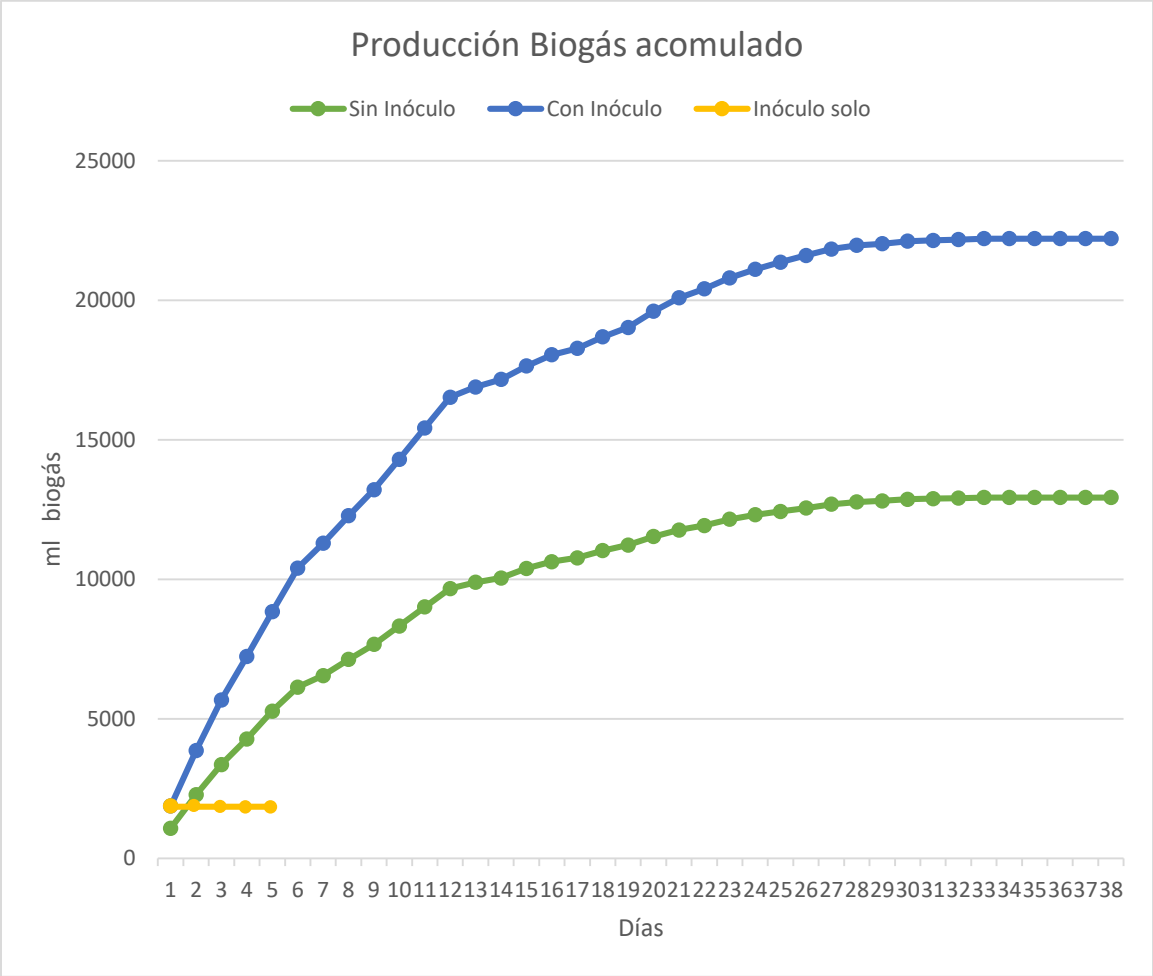


Figura 43: Producción de biogás acumulado. (elaboración propia)

En los días de mayor producción de biogás, se observó una mezcla homogénea, en donde se percibió, la generación de gas, desde la parte inferior del reactor, en forma de burbujas que salían a la superficie de la mezcla. Y durante los días en que la producción de gas comenzó a disminuir (del día 12 en adelante), se observó que la mezcla al interior de los reactores, comenzó a sedimentarse, esto quiere decir, los sólidos se precipitaron en el fondo, hasta el punto de poder observar claramente dos fases en la mezcla, una fase sólida en el fondo del reactor y una fase líquida en la parte superior con una capa de espuma.

Figura 44: Reactor en días de alta producción de biogás (fotografía propia)

Figura 45: reactor tipo Batch en días de baja producción de biogás (sedimentación). (Fotografía propia)

Es importante mencionar que la medición por desplazamiento de agua, permitió determinar cantidades considerables gas, sin embargo, en los últimos días de las mediciones, es decir, a partir del día 30, las mediciones de biogás no fueron perceptibles ni significativas.

Durante los días 4 y 5, se realizaron pruebas, con un encendedor, para corroborar que el biogás fuera inflamable, estas pruebas, fueron satisfactorias, ya que el gas mantuvo la llama generada por el encendedor, durante aproximadamente 12 segundos (el tiempo en el que se desocupo el contenido total de la bolsa).

Las condiciones de temperatura, se mantuvieron constantes, presentando cambios en los días 1 al 6, como se observa en los gráficos. Este cambio de temperatura, están relacionados directamente con los picos de producción de biogás, mientras la mezcla se encontraba más fresca, con una producción de biogás mayor.

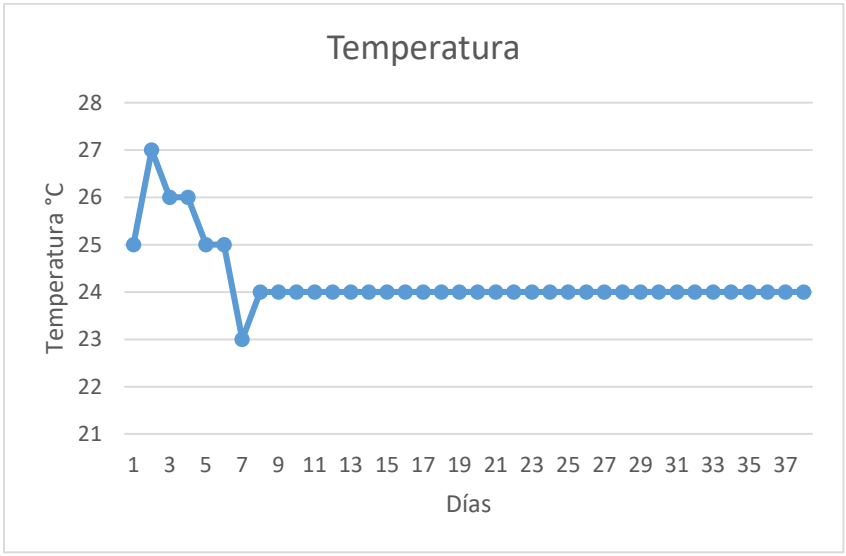


Figura 46: comportamiento temperatura para el reactor A1 (elaboración propia)

El control del pH, fue una de las variables más importantes para garantizar la estabilidad del proceso de DA y se realizaron pruebas con anticipación, para estudiar el comportamiento del bicarbonato en las mezclas de los reactores. El pH inicial del sustrato fue de 4,4, un pH bastante ácido, que se podría justificar por la presencia de cítricos, plátano y otras frutas con pH similar. Para el inóculo, se obtuvo un pH de 7,2, que permitió en el momento de hacer la mezcla con el sustrato, alcanzar un pH de 6,4 a la que se le adicionó 0,8 g de NaHCO3, para obtener un pH inicial de 7,3, dentro de los límites recomendables para la DA.

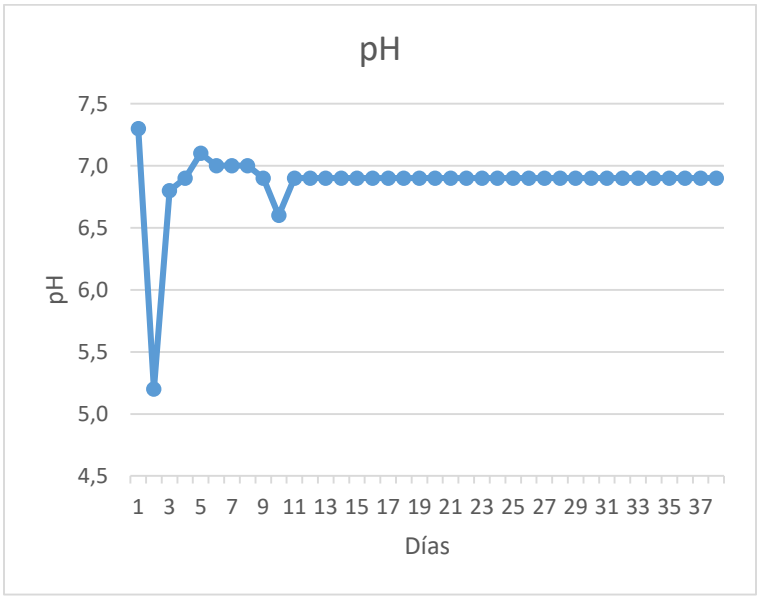


Figura 47: comportamiento del pH para reactor A1. (Elaboración propia)

El manejo del pH a lo largo del proceso tuvo variaciones significativas, durante los primeros 4 días, alcanzando valores de 5,2, los cuales fueron ajustados mediante la adición de NaHCO3, para garantizar valores entre 6,9 y 7,3.

El uso de NaHCO3, fue determinado a través de ensayos previos, en los que se probó modificar el pH utilizando: NaHCO3, CaO (oxido de calcio, en forma de cal común) y carbonato de calcio CaCO3, tres elementos frecuentemente utilizados en reactores anaerobios, según la revisión del estado del arte. De estas opciones, con la que se obtuvo un mejor resultado, debido a la estabilidad del pH en el tiempo fue con NaHCO3.

5.3 Potencial de producción de biogás en el Complejo Habitacional La Herradura

Según los resultados obtenidos del potencial de energía y la cantidad de residuos producidos para el caso de estudio: Complejo Habitacional La Herradura se estima que con los 5.832 Kg de RSO, producidos al mes por los 180 apartamentos del edificio, sería posible producir 1.198,17 m^3 de biogás, a partir del potencial obtenido de 0,2054 m^3 / Kg de RSO.

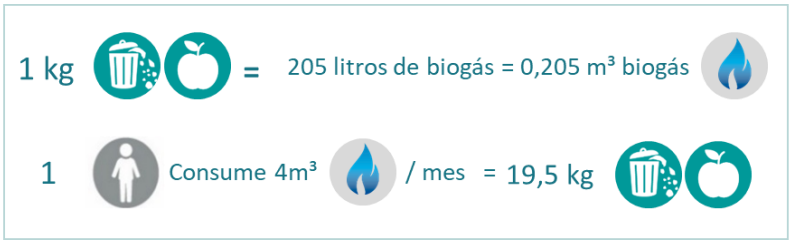


Figura 48: Proyección de RSO para consumo de gas, según potencial obtenido. (Elaboración propia).

Una persona consume aproximadamente 4 metros cúbicos de gas natural al mes, según las Empresas Públicas de Medellín (epm, 2017), esto quiere decir, que para obtener el biogás a partir del potencial obtenido, serían necesarios 19,5 kg de RSO por persona al mes y que para un hogar de 4 personas, con un consumo mensual de 16 metros cúbicos, serían necesarios 78 kg de RSO.

A partir de esto, se proyecta que de los 5.832 kg de RSO, que equivaldrían a 1.198,17 m^3 de biogás producidos a partir de la DA en La Herradura, equivaldrían al consumo mensual en gas natural de 75 hogares (el 41% de los 180 apartamentos del complejo de Herradura).

Este beneficio, permitiría, además de un ahorro económico producto de la reducción en el consumo del gas natural domiciliario, la reducción de las emisiones generadas por el metano, que, de no ser quemado en estufas de gas, calentadores u otros usos, iría directamente a la atmosfera, generando afectaciones para el medio ambiente, que se estimarán en el siguiente capítulo.

El potencial energético contenido en los RSO producidos en el Complejo Habitacional La Herradura, a partir de la DA, en términos de biogás es de 1.198,17 m^3, y que en términos de equivalencia, podría compararse con los siguientes tipos de energía indicados en la ilustración:

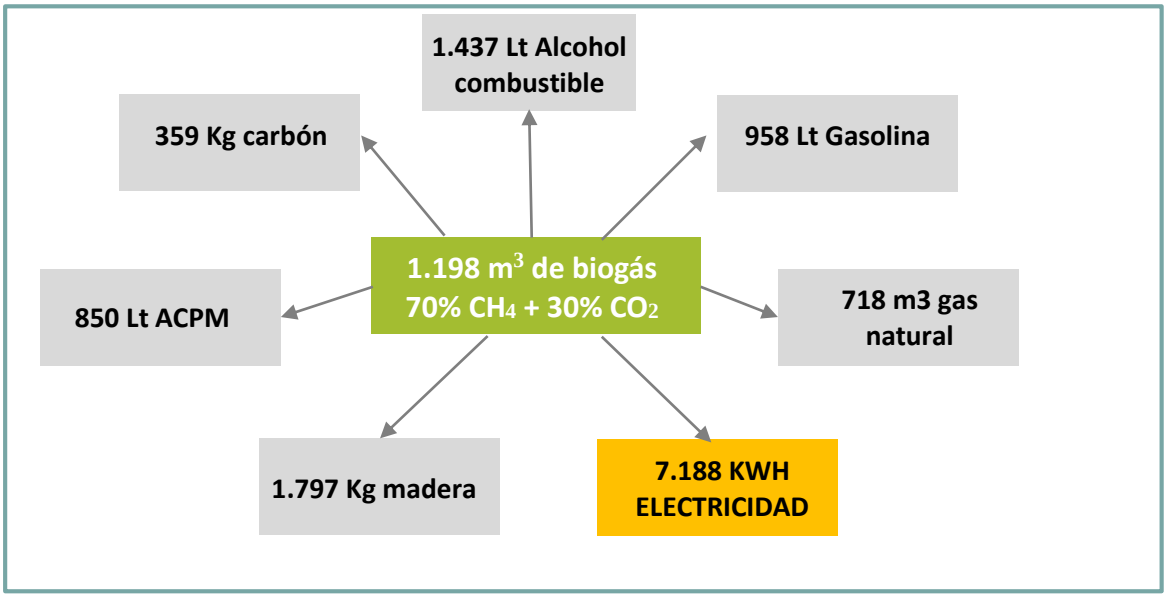


Figura 49: Potencial energético del Biogás producido en La Herradura. Adaptado de: http:/www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf

En los siguientes capítulos se profundizará en las tecnologías que permitirían aprovechar el potencial energético de los RSO, teniendo en cuenta, sus costos de aplicación en relación a los beneficios obtenidos.

6. CAPÍTULO VI: ALTERNATIVAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS

En el país, al igual que en la mayoría de regiones del mundo, la producción de energía a partir de fuentes alternativas toma cada vez mayor fuerza. Para el caso de Colombia, ya se han adoptado algunas medidas; desde el Ministerio de Minas y Energía (2007), el Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050, hace especial énfasis en la vulnerabilidad del sistema de producción de energía eléctrica frente a fenómenos como el cambio climático y factores externos, motivo por el cual se propone fomentar y promover el uso de energías alternativas, con el fin de diversificar la canasta energética de los colombianos. Adicional a esto, con el decreto 1285 de 2015 se normaliza la reducción en consumos de agua y energía para edificaciones nuevas, en la búsqueda de promover la eficiencia energética y el desarrollo de construcciones sostenibles y amigables con el medio ambiente. Este tipo de medidas, adoptadas dentro de la normativa de los países, hacen que la búsqueda por producir energía a partir de fuentes alternativas, tengan incentivos en el contexto legal para el caso de Colombia, que en un futuro pudiera generar beneficios tributarios para las partes involucradas en estos nuevos desarrollos adicional a los beneficios sociales y ambientales.

A partir del contexto político y la problemática frente a la dependencia a fuentes de energía eléctrica, se planteó el uso del biogás producido a partir de RSO en dos escenarios: 1. Para

el aprovechamiento del metano para ser utilizado directamente, en cocción, agua caliente, calefacción y 2. Para la producción de energía eléctrica, a partir del uso de turbinas y micro-turbinas de gas, como la tecnología más utilizada y disponible en el medio para este fin.

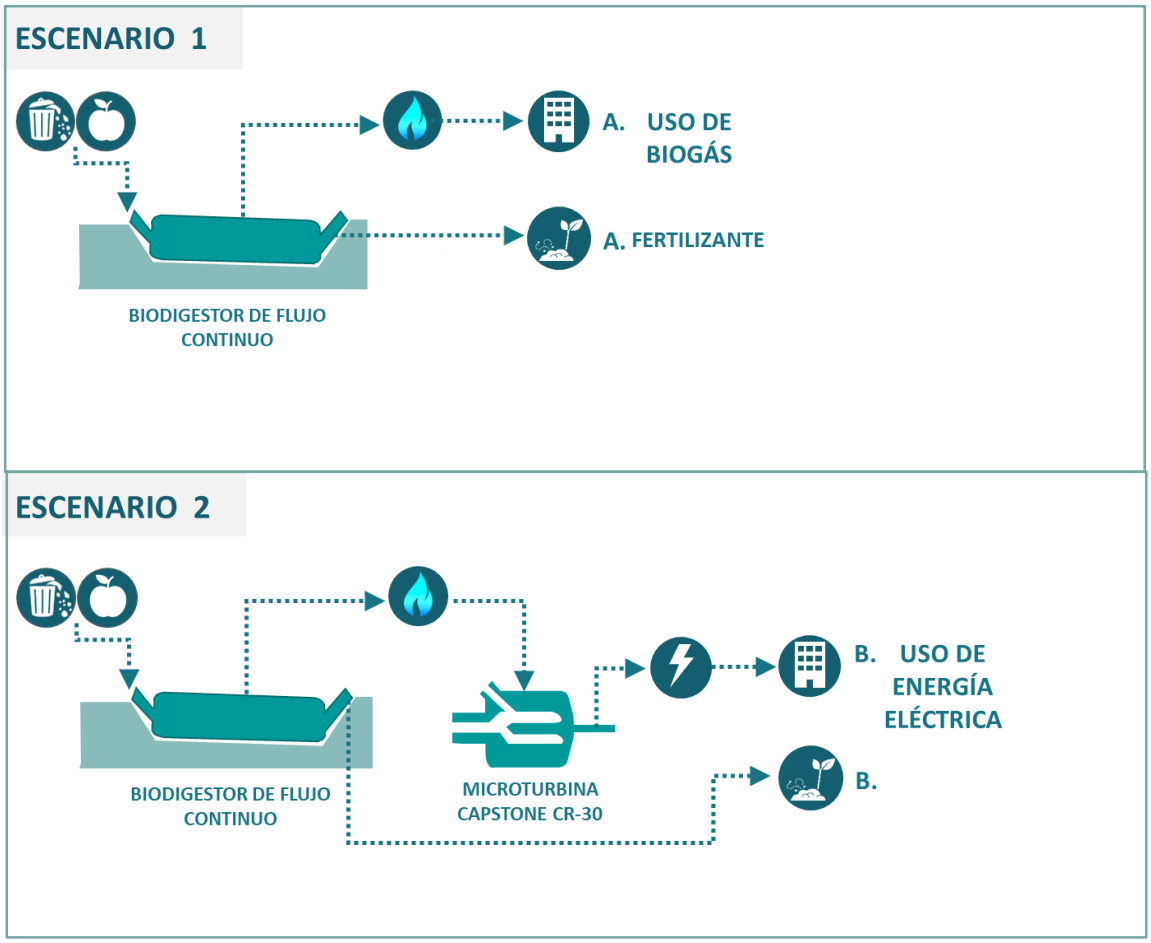


Figura 50: Escenarios para el método de producción de energía. (Elaboración propia)

6.1 Biodigestores

Para la aplicación de la tecnología de DA, en el caso de estudio: Complejo Habitacional la herradura, se tuvieron en cuenta, diferentes sistemas de biodigestores disponibles, para obtener el biogás a partir de los RSO. Estos tipos de biodigestores, se clasifican según su tasa de rendimiento: de baja tasa y de alta tasa.

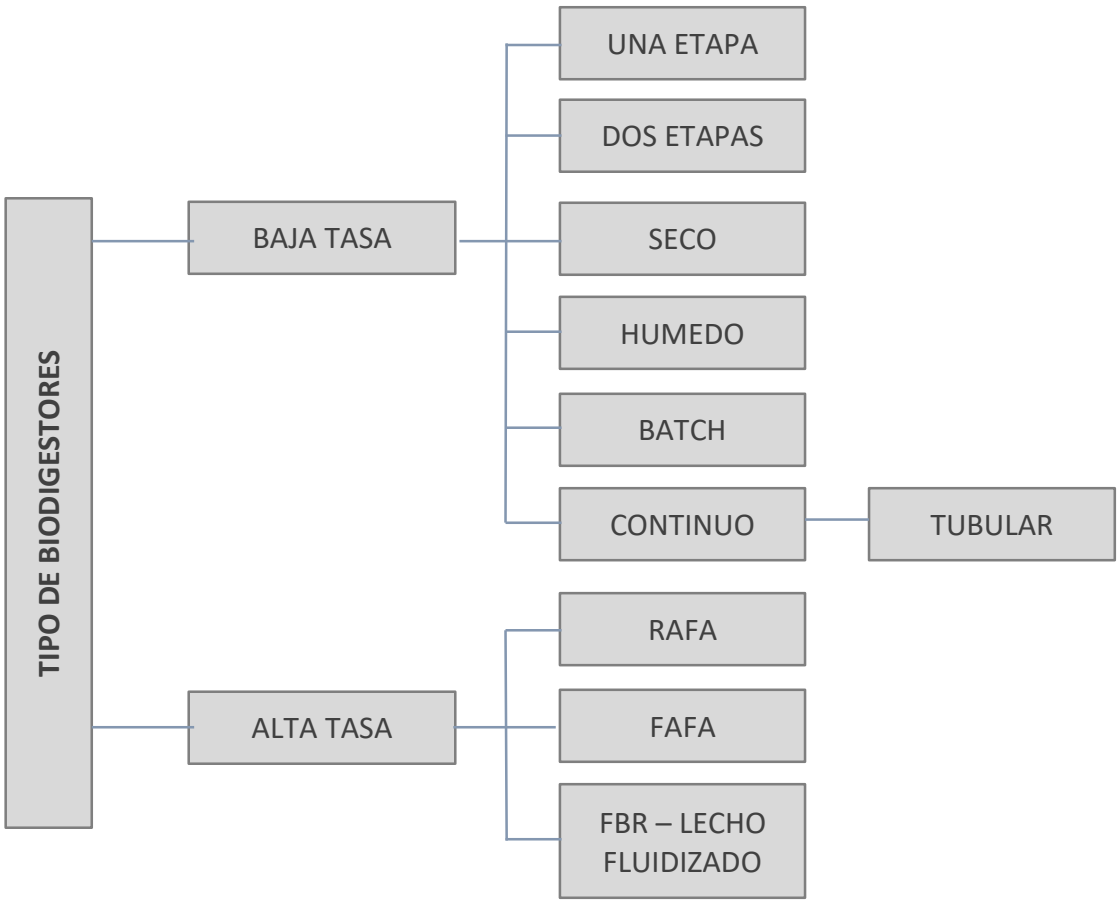


Figura 51: Tipos de Biodigestores, Adaptado de:: (Shah, Mahmood, Rashid, Pervez, & Raja, 2015)

Baja Tasa:

Los reactores de baja tasa, o sistemas convencionales, son reactores con mayores tiempos de retención hidráulica (TRH), y en los que en la mayoría de casos no se utilizan sistemas de calentamiento ni de agitación del reactor, por lo que pueden ser catalogados como sistemas con tecnologías más sencillas que los reactores de tasa alta. (Cabeza, 2008). Estos sistemas son de fácil aplicación y mucho más económicos que los de alta tasa, además no requieren un control avanzado de las variables durante el proceso de DA.

Alta Tasa:

Los reactores de alta tasa, son reactores con un mayor desarrollo tecnológico, que implican en la mayoría de casos el uso de altas temperaturas, recirculación de líquidos ó gases, con sistemas de mezclado, esto hace que la degradación del material sea mayor, debido a que hay un mayor contacto con los microorganismos y se reduce la posibilidad que haya material inactivo en el reactor. Estos reactores son utilizados principalmente para mezclas con bajos contenidos de sólidos suspendidos, debido que la recirculación puede presentar problemas de taponamientos cuando existen demasiados sólidos; por esto, son altamente utilizados para tratamiento de aguas residuales, lixiviados y residuos líquidos con bajos contenidos de sólidos. Para el caso de RSO, no se han desarrollado sistemas comerciales.

Para futuras investigaciones se ve una oportunidad para estudiar la aplicación de sistemas de alta tasa, para el tratamiento de RSO.

Como se mencionó anteriormente en la revisión del estado del arte, los sistemas más sencillos, y de fácil aplicación, son los que han tenido mayor éxito en países en vía de desarrollo, debido a las condiciones económicas y las tecnologías disponibles en estos países que hacen que el manejo de un reactor de alta tasa, implique el manejo por parte de técnicos especializados y tengan problemas de funcionamiento con el tiempo. Debido a esto, para el caso de estudio se trabajará con sistemas de baja tasa que permitan un manejo y mantenimiento adecuado por parte de la misma comunidad.

En la siguiente tabla se muestran algunas características de los tipos de reactores, recopiladas por Shah y otros (2015):

CRITERIO	**Digestores Una etapa vs. Dos etapas**		**Digestores Secos vs. Humedos**		**Digestores Batch vs. Continuos**		**Bioreactores de alta tasa**
	Una etapa	**Dos etapas**	**Seco**	**Humedo**	**Batch**	**Continuo**	
Producción de biogás	Irregular y discontinuo	Alto y estable	Alto	Bajo e irregular	Irregular y discontinuo	Continuo	Continuo y alto
Contenido sólido	10 - 40%	2 - 40%	2 - 12%	25 - 40%	2 - 15%	<4 - 15%	
Costo	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Bajo	Ato	Alto
Reducción de Sólidos Volátiles	Bajo a alto	Alto	40 - 70%	40 - 75%	40 - 70%	40 - 75%	75 - 98%
TRH en días	10 - 60	10 - 15	14 - 60	25 - 60	30 - 60	30 - 60	0,5 - 12

Tabla 12: Comparación de diferentes configuraciones de digestores para residuos con alto contenido de sólidos. Fuente: (Shah, Mahmood, Rashid, Pervez, & Raja, 2015)

Entre los reactores de baja tasa, en el país, los más utilizados, para la producción de biogás, han sido los sistemas de flujo continuo tubulares, o de estructura flexible, que son biodigestores en polietileno (plástico) y a comparación de sistemas tradicionales como el tipo hindú y chino con estructura de mampostería, tienen un precio por debajo de estas

tecnologías, además de la facilidad en su instalación. Los biodigestores de estructuras flexibles han sido ampliamente utilizados en entornos rurales, demostrando su excelente capacidad para la producción de biogás, sin embargo, requieren de espacios amplios para su instalación, debido a los TRH entre 30 y 60 días.

A continuación, se muestra el esquema para un biodigestor de flujo continuo tubular en polietileno:

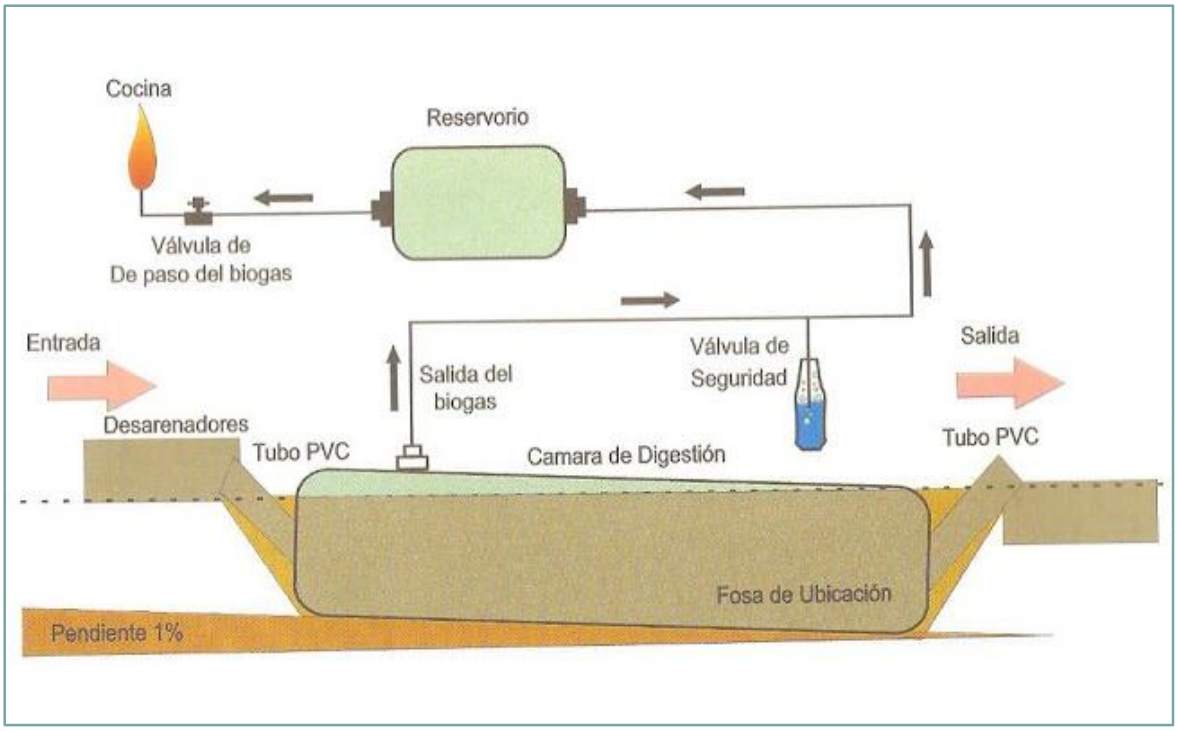


Figura 52: Esquema biodigestor de flujo continuo Fuente: http://biodigestoresdeflujo.blogspot.com.co/

El funcionamiento de este tipo de biodigestor, es bastante sencillo; consiste en un recipiente en material plástico, que contiene el gas y la mezcla del sustrato, apoyado sobre el terreno,

con una pendiente mínima (1 o 2%), que garantice que el sustrato pueda irse desplazando a medida que ingresa nuevo material al biodigestor. Debido a la estructura flexible del polietileno, el biodigestor se ubica en una zanja en el suelo, que a su vez permite generar la pendiente fácilmente; en la entrada al reactor, va una cámara, que puede ser en ladrillo, en donde trituran por medio de una trituradora o molinillo manual y se mezclan los RSO con el agua y el inóculo, para ser empujados por un tubo de PVC conectado al biodigestor; en la parte final, otra cámara permite ir retirando el material procesado. El biogás producido puede pasar directamente a ser utilizado, o a una micro-turbina. En el caso que el biodigestor presente una sobrepresión por exceso de biogás, es recomendable añadir en la tubería de salida una válvula, que permita que el exceso de biogás pueda salir, sin riesgo de generar explosiones.

Para calcular el volumen del biodigestor, de forma cilíndrica, se tomaron los siguientes valores, para un periodo de 30 días, que corresponden al TRH para un Digestor de flujo continuo y a los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio, en la que la producción de metano, se mantuvo hasta el día 28 aproximadamente.

A continuación, se expresa el cálculo del volumen para un biodigestor tubular, de radio 1,50 metros, a partir de los RSO producidos en el Complejo Habitacional La Herradura:

Vol. RSO mes + Vol. Agua + Vol. Inóculo + Vol. Gas día = Vol. total Biodigestor

0,2 Ton. RSO = 1m^3, según (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017)

Vol. RSO / mes = 5.832 kg = 29,16 m^3

Vol. agua (Rel. 1:3) = 87,48 m^3

Vol. Inóculo (10%) = 17,5 m^3

Vol biogás día = 39,93 m^3

Radio tubular de plástico = 1,5 m^3

$$29{,}16m^3\ RSO + 87{,}48m^3\ Agua + 17{,}5m^3\ Inóculo + 39{,}93m^3\ Biogás$$

$$= 174{,}07\ m^3\ Vol.total\ Biodigestor$$

$$Vol.Biodigestor\ Cilindrico = \pi * r^2 * L$$

$$\frac{Vol.Biodig.}{\pi * r^2} = L$$

$$\frac{174{,}07\ m^3}{3{,}1416 * 1{,}5^2} = L$$

$$Longitud\ Biodigestor\ tubular\ con\ radio\ de\ 1{,}5m =$$

$$24{,}63\ m\ de\ largo$$

Esto quiere decir que, para un biodigestor de 2 m de diámetro, se necesitaría una longitud de 24,63 m, para garantizar que los residuos producidos por el Complejo Habitacional La

Herradura con un TRH, puedan ser procesados mediante Digestión anaerobia, para la producción de biogás.

En el siguiente gráfico se especifican las dimensiones de un sistema de flujo continuo en polietileno, para la cantidad de RSO producidos en el Complejo Habitacional La Herradura:

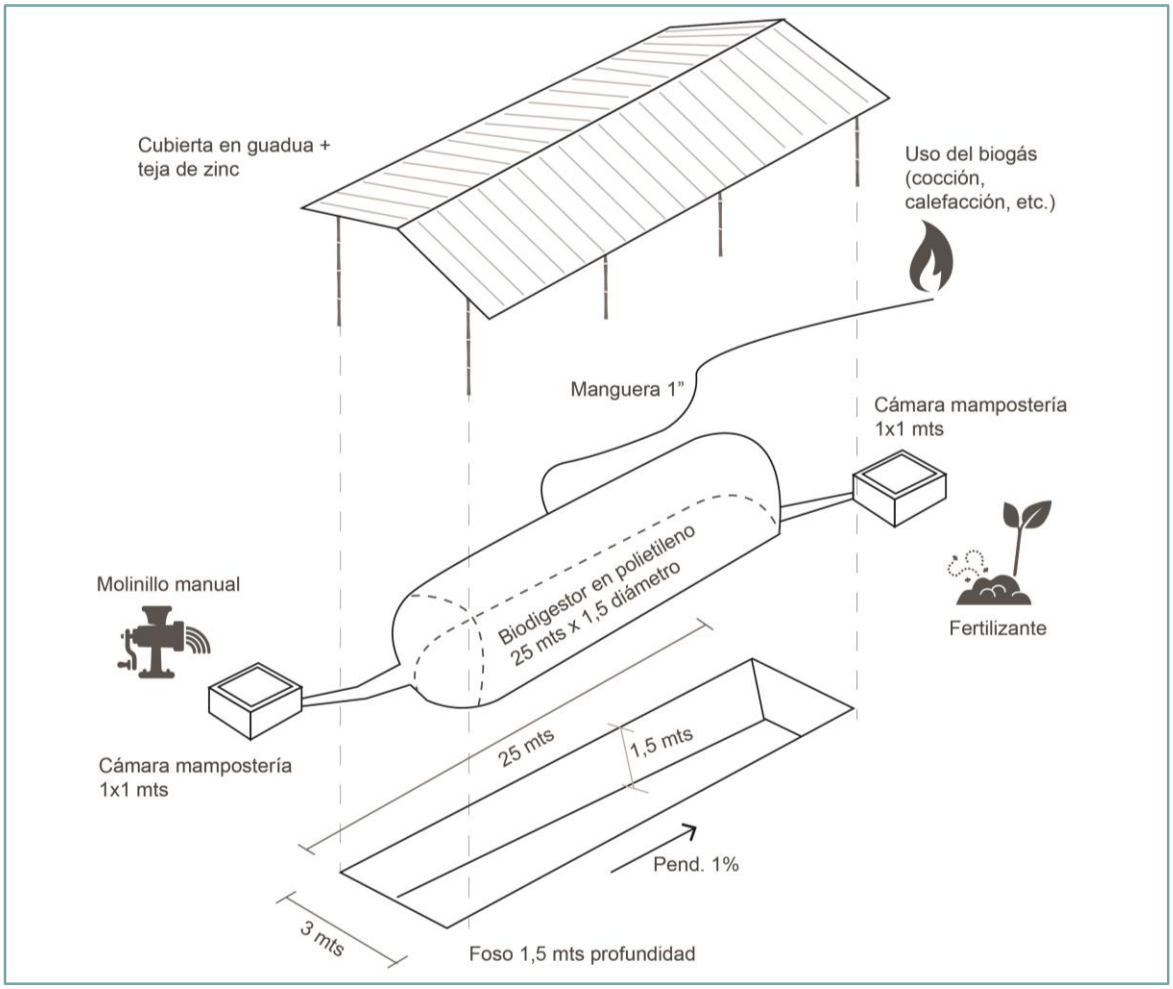


Figura 53: Esquema biodigestor para La Herradura. (elaboración propia)

El valor estimado de un biodigestor de las dimensiones especificadas, para el Complejo Habitacional La Herradura, se especifican en la siguiente tabla, para precios estimado del 2017:

INSUMO	UNID.	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	TOTAL
Plástico tubular R=3mts x 25 mts	glb	1	$ 1.400.000	$ 1.400.000
Excavación manual 3,00 x 1,50 x 25 mts	m3	112,5	$ 24.590	$ 2.766.375
Trituradora manual (incluye tolva 0,60 x 0,50 mts y soporte)	und.	1	$ 1.500.000	$ 1.500.000
Cámaras en mampostería 1,00 x 1,00 x 1,80 incluye mano de obra	glb	2	$ 500.000	$ 1.000.000
Tubos en PVC 8"	und	1	$ 33.900	$ 33.900
Manguera polietileno 1" x 3m mts	mts	1	$ 46.000	$ 46.000
Teja en zinc 4,00x25	m2	100	$ 10.500	$ 1.050.000
Estructura en guadua	glb	1	$ 580.000	$ 580.000
Mano obra 2 oficiales + ayudante día	día	2	$ 175.000	$ 350.000
			TOTAL	**$ 8.726.275**

Tabla 13: Cálculo para el valor de un biodigestor de 174 m^3. (elaboración propia)

El valor del m^3 de gas natural, para estrato 2, según EPM (2017), es de $851,81 pesos, lo que quiere decir que el ahorro mensual en gas natural, de producir 1.198 m^3 de biogás, sería de $1.020.468 pesos mensuales, para el Complejo La Herradura, que se vería a partir del octavo mes de aplicación del sistema y librar la inversión durante ese periodo. Esto significa que, para un año, se podrían lograr un ahorro en consumo de gas natural de $12.245.616 pesos, equivalentes a $68.031 pesos por cada uno de los 180 hogares del edificio, o como se mencionó en el capítulo anterior, alcanzaría para la sustitución del consumo de gas para 75 apartamentos (41% de los 180 apartamentos) con un consumo mensual de 16 m^3 cada uno, según el consumo promedio. (epm, 2017)

El tiempo de vida útil del biodigestor sería aproximadamente de 10 años, tiempo con el que calculamos la recuperación de la inversión y los beneficios obtenidos por la producción de biogás durante ese periodo de tiempo, teniendo en cuenta que la operación y el mantenimiento del biodigestor es mínimo, y ambos podrían ser realizados por los mismos habitantes.

Costo inicial Biodigestor	$	8.726.275
Biogás producido en 10 años		143.760 m2
Precio m3 gas natural para estrato 2	$	851,81
Precio total biogás producido	$	122.456.206
AHORRO TOTAL (descontando Inv. incial)	**$**	**113.729.931**

Tabla 14: Costos y recuperación de la inversión de un biodigestor. (elaboración propia)

Es importante, tener en cuenta que el material procesado, sale del biodigestor como se mencionó anteriormente en forma de fertilizante, que pudiera generar ingresos adicionales a los ahorros propiamente dichos de la reducción del consumo de gas natural; estos ingresos adicionales se muestran a continuación:

Material procesado - Fertilizante mes		5832 kg
Precio Fertilizante mes (bulto 50Kg = $12,000)	$	1.399.680
TOTAL FERTILIZANTE 10 AÑOS	**$**	**167.961.600**

Tabla 15: Fertilizante producido. (elaboración propia)

Como se puede evidenciar en este ejercicio, este tipo de tecnología, podría amortizar la inversión inicial, fácilmente en 4 meses aproximadamente, y reducir en gran medida la cantidad de residuos sólidos destinada a rellenos sanitarios y sitios en donde se desperdicia por completo su potencial y valor energético.

A continuación, se resume el costo de la inversión inicial y los valores de biogás y fertilizante producidos al mes:

Costo inicial Biodigestor	$	8.726.275
Biogás producido al mes		1.198 m2
Precio m3 gas natural para estrato 2	$	851,81
Precio total biogás producido / mes	$	1.020.468
Material procesado - Fertilizante mes		5832 kg
Precio Fertilizante mes (bulto 50Kg = $12,000)	$	1.399.680

Tabla 16: Costo biodigestor y producción mensual. (Elaboración propia)

A partir de estos valores, se tiene una recuperación de la inversión inicial de 9 meses, si se tiene en cuenta únicamente el ahorro generado por el biogás (valor de biogás / mes $1.020.468 x 3 meses = $9.184.212); y un tiempo de recuperación de la inversión de 4 meses, si se tiene en cuenta el valor del fertilizante generado más el ahorro del biogás (valor de biogás + fertilizante / mes $2.420.148 x 4 meses = $9.680.592).

Figura 54: Recuperación de la inversión para Biodigestor. (Elaboración propia)

Si bien el ahorro en gas natural a 10 años, para el complejo habitacional sería de 115 millones de pesos más $167.961.600 de fertilizante en diez años, solo representaría un valor de $1.573.283 pesos para cada uno de los 180 apartamentos en ese periodo de 10 años, sin embargo, hay una cantidad de afectaciones al medio ambiente y la ineficiencia del metabolismo urbano, que, al ser problemáticas de escala mayor, se ven reflejadas a partir de la aplicación de este tipo de iniciativas a nivel de región. Más adelante se analiza este punto de vista, a partir de los potenciales obtenidos y aplicados a otras escalas.

6.2 Turbinas y Micro-turbinas de gas

Las turbinas de gas son máquinas térmicas rotativas que utilizan como combustible: gas natural, biogás o diésel para generar esfuerzo y trabajo a partir de una reacción de combustión; el trabajo obtenido de esta reacción se emplea para rotar el eje de la turbina conectado a un generador eléctrico externo, que transforma una parte del trabajo generado en energía eléctrica; el resto de energía se disipa en forma de calor y gases.

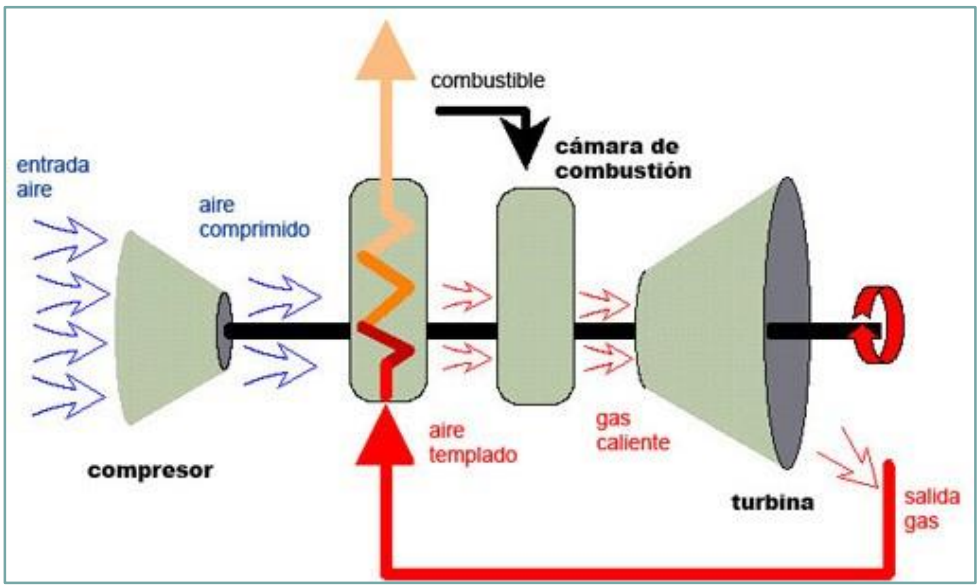


Figura 55: Ciclo de funcionamiento para turbinas y micro turbinas. Fuente: http://www.micropowereurope.com/Tecnolog-a/

Las turbinas, funcionan a partir del ciclo de Brayton, que define las etapas de la reacción y a partir de estas, las partes de la turbina; estas son: 1.Admisión de aire: para realizar la combustión se requiere elevar la presión, por lo que las turbinas utilizan aire del ambiente, y lo pasan a través de filtros que evitan la entrada de impurezas a la turbina, 2.Compresión: el aire es comprimido para aumentar la presión y temperatura, 3.Combustión: en una

cámara de combustión el aire se mezcla con el combustible (gas, diesel o biogás), se produce la ignición y como resultado la expansión de los gases produce un mayor volumen, calor y altas velocidades, 4.Turbina: los gases expandidos, con altas velocidades pasan a mover el eje de la turbina; este eje produce movimiento rotatorio para conectarse a un generador externo que permita la producción de energía.

Las turbinas tradicionales, tienen muchos componentes y compresores en varias etapas, que requieren mantenimiento frecuentemente; tienen grandes dimensiones, baja eficiencia, altos niveles de ruido, altos costos de mantenimiento, e implican una inversión grande, motivo por el cual no ha sido común su uso en edificaciones, sino en plantas a gran escala, como, plantas de tratamiento de residuos, industrias, etc.

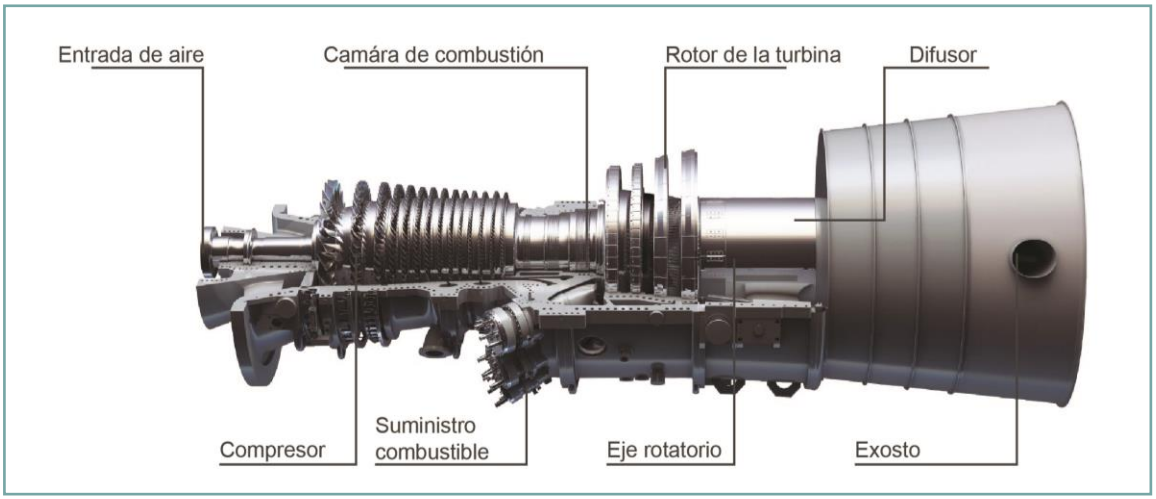


Figura 56: Turbina de gas GE, Fuente: adaptado de https://www.gepower.com/gas/gas-turbines/9ha

Como alternativa a las turbinas tradicionales, se encuentran las micro-turbinas de gas, que funcionan bajo el mismo principio del ciclo de Brayton, sin embargo, presentan una mayor eficiencia, al contar con menos componentes y piezas más sencillas, que requieren menor

mantenimiento; además la mayoría cuentan con un eje alternador que produce directamente la energía eléctrica, esto quiere decir, que, para el caso de algunas micro-turbinas, el generador se encuentra incorporado dentro de la misma micro-turbina, lo que permite una mayor eficiencia y menores costos de inversión.

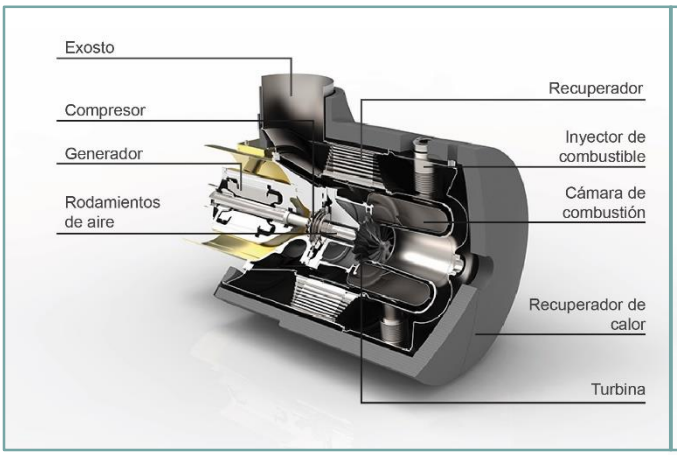


Figura 57: Partes de una micro-turbina Fuente: (CAPSTONE, s.f.)

Figura 58: Eje alternador de una micro-turbina Fuente: (CAPSTONE, s.f.)

La definición de micro-turbina, no ha sido establecida dentro de unos rangos de potencia determinados, pero algunos autores hablan que para potencias entre 5 KW y 200 KW pueden ser catalogadas como micro-turbinas. (Baños, 2010)

Algunas de las turbinas y micro-turbinas disponibles en el mercado, se muestran en la siguiente tabla; véase para las turbinas, las potencias relativamente altas, respecto a las micro turbinas: (los precios incluidos en la tabla, son para el 10 de noviembre de 2017 e incluyen los equipos instalados).

Referencia	Potencia Neta	Rendimiento Electrico Neto %	Combustible	Niveles de ruido	Dimensiones en mts ancho*largo*alto	Precio US	Precio COL	Mantenimiento
Micro-turbina CAPSTONE CR30	30 KW	26%	Biogás, Gas natural, Disel	65 dBA	0,76 * 1,52 * 1,9 mts	$ 54.200	$ 162.864.496	c/ 5 años $9.519.840
Micro-turbina CAPSTONE CR60	60 KW	29%	Biogás, Gas natural, Disel	70 dBA	0,76 * 2,00 * 1,9 mts	$ 86.700	$ 260.533.500	c/ 5 años $9.519.840

* 1 dólar = 3.005 Col. Pesos

Tabla 17: Turbina y Micro-turbinas disponibles en el mercado. Fecha de tasa del dólar el 10 de noviembre de 2017. (elaboración propia)

Según la disponibilidad de turbinas, y las limitantes económicas y volúmenes de producción de biogás para el caso de estudio, la micro-turbina CAPSTONE CR30, es el equipo de referencia, debido a su costo inferior y capacidad suficiente para el caso de estudio.

A continuación, se analizan las implicaciones que tendría la transformación del biogás producido a energía eléctrica, utilizando la micro-turbina CR30.

Para el Complejo Habitacional La Herradura, la producción de biogás mensual a partir de RSO, se estimó en 1.198 m^3, con un contenido de CH_4, estimado por la literatura en 70% en el mejor de los escenarios, con un PCI de 6 KW/m^3 y se utilizó un rendimiento de la micro-turbina CR30 de 26%, expresados en la siguiente ecuación para determinar la potencia de energía eléctrica disponible:

$$Potencia\ disponible\ (kW) = n_t * PCI_{\ biogas} * Q_{\ biogas}$$

Donde:

n_t = rendimiento térmico de la generación eléctrica = 26% para micro-turbina CR30

$PCI_{\ biogás}$ = poder calorífico del biogás = se asume 6 KW/m^3

$Q_{\ biogás}$ = caudal de biogás producido (m^3 biogás)

* método tomado de: (BID: Banco Interamericano de Desarrollo, 2017, pág. 34)

$$Potencia\ disponible = 26\% * 6\frac{Kw^3}{m} * 1.198\ m^3\ biogás$$

$$Potencia\ disponible = 1.868{,}88\ kW$$

Según esto, se podrían generar en La Herradura, 1.868,88 kW al mes, a partir de 5.832 Kg de RSO, o 0,32 kW por Kg de RSO, utilizando una micro-turbina CR30 con una eficiencia del 26%, que, para efectos de costos, representarían $877.290 pesos al mes, tomando un valor de $469,42 pesos por kW/h para estrato 2, según reportes de EPM: agosto (2017). Los 1.868,88 kW/h producidos al mes, correspondes a un ahorro de 6,8% del consumo para los 180 apartamentos en La Herradura, tomando un consumo promedio de 152kW/h mes por apartamento, es decir, 38kW/h mes por persona. (epm, 2017) Esa cantidad de energía también sería igual al consumo total de 12 apartamentos al mes; si bien estos valores son bajos con respecto al consumo total, más adelante se establece la relación costo-beneficio de implementar este tipo de alternativas.

Para el caso de la micro-turbina CR30, debe determinarse las horas pico de consumo, para determinar en qué momentos del día pudiera encenderse la turbina, entendiendo que estas condiciones de funcionamiento y encendido en horas específicas, no presenta ningún inconveniente para este tipo de turbina, debido a la simplicidad del sistema.

A partir de estos valores, se establecen los valores de inversión inicial y costos de mantenimiento, de un sistema de producción de biogás, a partir de un biodigestor de flujo continuo en polietileno, con una micro-turbina CAPSTONE CR30 para la producción de energía eléctrica conectada directamente a la red interna del edificio (para este caso, la potencia producida sin kW excedentes, no permitiría suministrar energía a la red pública):

ACTIVIDAD	USD	Col. Pesos
Inversión Biodigestor	$ 2.904	$ 8.726.275
Retorno producción fertilizante / año	$ 5.589	$ 16.796.160
Inversión Micro-turbina CR30	$ 54.200	$ 162.871.000
Ahorro energía eléctrica / año	$ 3.503	$ 10.527.480
Total inversión inicial		**$ 171.597.275**
Retorno total / año		**$ 27.323.640**
Periodo recuperación de I. inicial		**6,2 años**

Tabla 18: Recuperación de inversión para biodigestor y micro-turbina (Elaboración propia)

A partir de este ejercicio, se puede estimar que el costo de la inversión inicial del biodigestor y la micro-turbina CR30, podría amortizarse en 6,2 años, teniendo en cuenta el valor de energía y de fertilizante producido (fertilizante + energía / mes $2.276.970 x 6,2 años y 3 meses = $171.597.275) y a partir de ese punto se estaría obteniendo un retorno de $170.097.275 pesos al año, (sin incluir mantenimiento), lo que significaría un valor de $944.984 pesos anuales por apartamento.

Para el caso de la recuperación de la inversión, teniendo en cuenta únicamente el valor del ahorro en energía eléctrica, se tendría una recuperación de la inversión inicial de 16 años y 3 meses de producción (energía / mes $877.290 x 13 años y 3 meses = $171.597.275).

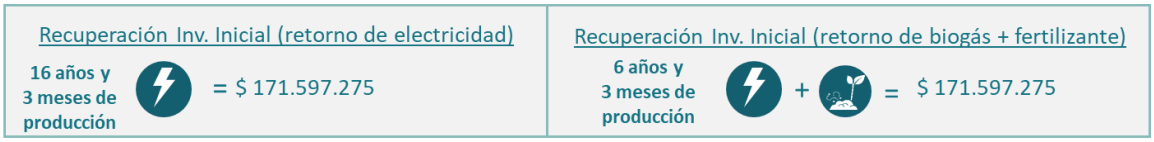


Figura 59: Recuperación de la inversión para Biodigestor + Microturbina. (Elaboración propia)

Estos valores podrían mejorar significativamente al utilizar equipos más eficientes, que, para el momento del ejercicio, los equipos utilizados, representan los equipos idóneos ofrecidos por el mercado.

A partir de estos ejercicios, se obtiene que el método con un tiempo de recuperación menor, corresponde al biodigestor de flujo continuo, para utilizar el biogás en los hogares sin la producción de energía eléctrica, con un periodo de recuperación de la inversión de 4 meses, en relación a un periodo de 6 años y 3 meses, para el método del biodigestor y la micro turbina para generar energía eléctrica.

Es importante tener en cuenta que, adicional a los beneficios en ahorro energético, hay una serie de relaciones de la implementación de este tipo de sistemas, con la reducción de emisiones y dinámicas de recolección de basuras, cuyo fin último es contribuir a un metabolismo urbano más eficiente y con menos afectaciones sobre el medio ambiente; estas observaciones se expresan a en el siguiente capítulo.

7. Discusión

Los residuos sólidos han sido una problemática transversal al metabolismo urbano en todas las regiones alrededor del mundo, desde la generación de energía y recursos a escala de ciudad, hasta la concepción del artefacto arquitectónico y sus dinámicas propias de consumo. Se ha evolucionado de la disposición de residuos sólidos a cielo abierto a sistemas de digestión anaerobia que permiten recuperar el potencial energético contenido en los mismos, con miras a sistemas ambientalmente sostenibles.

Para el caso de Colombia y más en específico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el manejo de residuos sólidos ha sido un tema desarticulado a elementos que contribuyen al problema de fondo, como lo son: la arquitectura, el metabolismo urbano, variables socioeconómicas y ambientales.

El manejo que se le ha dado a los residuos sólidos en rellenos sanitarios, es una dinámica que ha contribuido al deterioro ambiental y al no aprovechamiento del potencial energético contenido en la fracción orgánica de los residuos. Lo que ha implicado para la región y en últimas a su población, un detrimento que se traduce en altos costos del sistema de recolección de basuras, contaminación ambiental y dependencia a fuentes de energía tradicionales. A continuación, se hacen algunas consideraciones a partir de los resultados obtenidos.

7.1 Los residuos en la vivienda

La concepción de la vivienda multifamiliar y la mayoría de edificios, se viene realizando desde el punto de vista del artefacto arquitectónico como tal, desprovisto de todo tipo de sistemas tanto para la generación de energía, como para la separación y aprovechamiento de residuos, por lo cual deben ser acondicionados posteriormente a su construcción; este aspecto complejiza la adaptabilidad de nuevas tendencias dentro de las condiciones rígidas con las que se concibieron la mayoría de edificios e influye directamente en los hábitos de sus habitantes.

Existe un vacío evidente en cuanto a temas de educación ambiental para la población que explica la falta de interés por el tema, sin embargo, este vacío es producto de otro de los mayores obstáculos para una cultura del aprovechamiento de residuos: la falta de incentivos por parte de la administración y las empresas prestadoras del servicio público de recolección, para que se implementen campañas de separación y aprovechamiento de residuos, ya sea en la fuente o en los sitios de disposición final.

7.2 Potencial energético de los residuos sólidos orgánicos

Mediante un análisis de los residuos producido en viviendas multifamiliares: caso de estudio Complejo Habitacional La Herradura, se pudo determinar que la cantidad de residuos sólidos orgánicos constituye una alternativa para la producción de energía

eléctrica, a través del aprovechamiento del metano resultado de la digestión anaerobia de los mismos. Se obtuvo un potencial de 1.856 kW mes, a partir de 1.198 m^3 de biogás, provenientes de 5,8 toneladas de RSO producidos, lo cual se traduce una disminución del 6,8% en consumos de energía eléctrica, o 41% si se utilizase el biogás directamente.

Se obtuvieron valores de 205 ml de biogás por gramo de RSO, con respecto a investigaciones previas, en las que se utilizaron sustratos similares (como frutas, verduras y restos de alimentos), alcanzando valores similares en investigaciones como las realizadas por: (Nopharatanaab, Pullammanappallilac, & Clarke, 2007), (Owens & Chynoweth, 1993) y (Pacheco Gonzáles, 2016).

Es importe aclarar que todas las investigaciones de referencia tienen variables de entrada diferentes, como pH, contenido de SV, temperatura, agitación, etc. Debido a la complejidad del proceso de la digestión anaerobia, como una tecnología en constante desarrollo en la que se involucran reacciones tanto químicas como biológicas, ha sido complejo por parte de los diferentes autores llegar a un acuerdo que estandarice las variables, métodos y resultados alcanzados para realizar comparaciones entre estas; por esta razón, no hay promedios acordados que puedan tomarse como única referencia.

Durante el proceso de la digestión anaerobia se identificaron ciertos puntos que requerirían cierto grado de conocimiento, nociones básicas o un soporte técnico para las personas encargadas de los biodigestores, para garantizar los niveles óptimos de variables como pH, para la estabilidad del biodigestor y garantizar la continuidad del proceso de digestión.

Se recomienda para futuras investigaciones, tener en cuenta el costo de las cromatografías de gases, para determinar la composición exacta del biogás obtenido.

7.3 Alternativas de producción de energía a partir de residuos orgánicos

El potencial de los RSO, se presta para ser aprovechado mediante el uso de tecnologías como biodigestores, producción de fertilizantes y generación de energía eléctrica, que dependen de la disponibilidad de tecnologías en el mercado; estas como inversión inicial pueden involucrar altos costos, recuperables con el paso del tiempo debido a los ahorros generados.

La implementación de tecnologías como biodigestores anaerobios y micro-turbinas de gas, requieren conocimientos técnicos suficientes para garantizar el adecuado mantenimiento y funcionamiento a lo largo del tiempo, por lo que, al momento de implementarlos, debe tenerse en cuenta la escala y el nivel educativo de la población, para evitar experiencias poco fructíferas como las de India, en las que sistemas de este tipo pueden quedar obsoletos por la falta de soporte técnico.

A partir de los resultados obtenidos para el caso de estudio, se puede realizar una proyección, en la que la totalidad de RSO producidos en el AMVA pudieran ser tratados con sistemas de DA en la fuente, para la producción de metano o energía eléctrica, obteniendo resultados importantes en cuanto a costos del sistema de recolección, impacto ambiental y consumo eléctrico expuestos a continuación:

- Reducción de 22.319 toneladas de residuos sólidos orgánicos al mes que dejarían de ser recolectadas y dispuestas en el relleno sanitario La Pradera; 267.828 Ton/año.
- Reducción en costo mantenimiento para 46,6 camiones recolectores de basuras al mes, estimados en $864.861.250 pesos al mes, $10.378.335.000 pesos al año.
- Reducción de 7,07 toneladas al año de emisiones de hidrocarburos no quemados producto de los camiones recolectores que dejarían de circular.
- Reducción de 7.152 kW/h de consumo de energía eléctrica de fuentes tradicionales de energía al mes, producto de la energía que pudiera producirse a partir de RSO.
- Generación de 22.319 ton / mes de fertilizante.
- Reducción del total de residuos sólidos producidos de 666.264 ton/año a 398.436 ton/año, debido a los RSO en viviendas que se dejarían de considerar como residuos. Esto quiere decir, una reducción del 59% del total de residuos sólidos del AMVA.

Aún más importante que estos indicadores, es pasar a reconocer el valor real de los residuos orgánicos, evaluándolos como un recurso con potencial de energía que juega un papel fundamental para la eficiencia de las edificaciones y las ciudades, contribuyendo a generar un metabolismo urbano con menores afectaciones sobre el medio ambiente, en la búsqueda de un sistema con menor entropía.

8. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos, se generan las siguientes conclusiones como respuesta a los capítulos desarrollados, preguntas y objetivos planteados en la investigación.

Se evaluó el **potencial de energía eléctrica los residuos orgánicos** producidos en viviendas multifamiliares: caso de estudio La Herradura, para la generación de energía eléctrica a partir de la capacidad de producción de biogás de los residuos y su posterior conversión, obteniendo un **promedio de 1.856 kW/mes**; o **0,32 kW/h por Kg de RSO**. La viabilidad del sistema se comprobó a través de la relación costo-beneficio, en los que los costos de inversión inicial pueden ser asumidos con los ahorros generados.

Se identificó la composición y cantidad de residuos sólidos orgánicos producidos (RSO) en la vivienda, a partir de una caracterización básica de las muestras recolectadas y una comparación con el estado del arte, determinando características básicas como volumen, pH y cantidad de residuos producidos.

Se comprobó el **potencial energético de los residuos orgánicos** producidos en viviendas multifamiliares: caso de estudio La Herradura, obteniendo una producción de biogás de 205 ml de biogás por gramo de RSO, equivalente a **1.198 m^3 de biogás al mes, provenientes de 5,8 toneladas de RSO** producidos en el complejo habitacional La Herradura.

Se determinó el **método de producción de energía eléctrica** a partir de **residuos orgánicos** producidos en viviendas, por medio del uso de un **biodigestor de flujo continuo en polietileno** y una **micro-turbina de gas tipo CAPSTONE CR30**, alcanzando los resultados esperados en cuanto a viabilidad y aprovechamiento del potencial de los RSO producidos en la vivienda. Se obtuvieron para esto **tiempos de recuperación de la inversión inicial de 6,2 años**, en donde teóricamente **se validó la viabilidad del sistema**. Se recomienda la implementación del **sistema del biodigestor** solo, con un **tiempo de recuperación de inversión menor.**

9. Recomendaciones

Los residuos orgánicos como recurso con potencial energético, constituyen un campo de investigación interesante, a pesar que ha tenido desarrollo y acogida alrededor del mundo, no ha sido muy aplicado debido a la disponibilidad de otras fuentes de energía.

La aplicación de sistemas de producción de energía en edificaciones como viviendas multifamiliares ha tenido poco desarrollo y establece posibilidades de investigación y aplicación en entornos reales que tienen necesidades de abastecimiento energético y problemas de generación de residuos, por lo que se recomienda continuar con iniciativas de este tipo que podrían llegar a plantear aplicaciones interesantes.

Desde la concepción del artefacto arquitectónico se recomienda tener en cuenta la adaptabilidad de la infraestructura que permita implementar nuevas tecnologías durante la vida útil de la edificación, y una serie de medidas, como la ubicación e integridad de los sistemas para el aprovechamiento de residuos; a continuación, se mencionan algunas de estas medidas:

- Tener en cuenta el régimen de vientos al momento de proyectar la ubicación de los biodigestores, evitado malos olores para los habitantes de la edificación.

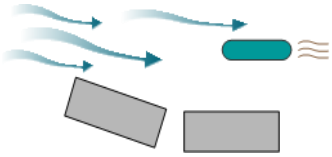


Figura 60: Régimen de vientos biodigestor. (Elaboración propia)

- Proyectar la ubicación de los biodigestores, teniendo en cuenta los espacios transitables de las edificaciones, para

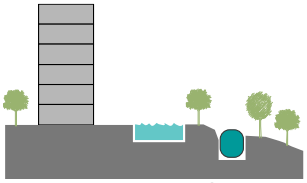


Figura 61: Implantación biodigestor (Elaboración propia)

evitar irrumpir en espacios peatonales, de uso recreativo u otros que generen conflictos en el funcionamiento del edificio.

- Involucrar el aprovechamiento de residuos en los diseños técnicos de las edificaciones, promoviendo alternativas como la construcción de múltiples ductos, que permitan la separación de residuos desde la fuente.

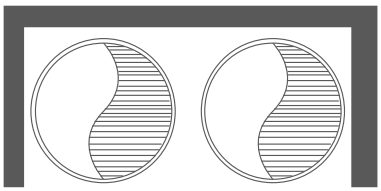


Figura 62: Shuts de basura (Elaboración propia)

- Promover desde el diseño, buenas prácticas para el reciclaje, como el acondicionamiento de espacios adecuados para este uso, que además de cumplir con las dimensiones exigidas por la norma, tengan en cuenta las condiciones particulares de cada edificación.

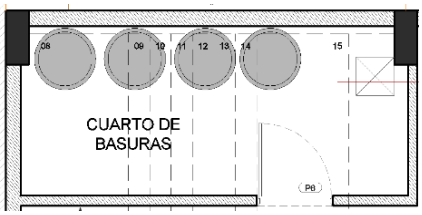


Figura 63: Cuarto de basuras (Elaboración propia)

- En estratos socio-económicos más altos, es viable evaluar diferentes alternativas para el uso de biogás, tales como: Climatización de piscinas y turcos, calentamiento de agua, y a nivel de diversificación se podría evaluar su uso para motores a gas o a vapor, combustible para fuentes móviles, entre otros.

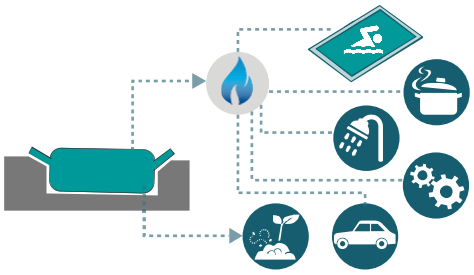


Figura 64: Usos del biogás (Elaboración propia)

- En complejos de edificios o en edificaciones que, por su reducido tamaño, el aprovechamiento de residuos no sea un sistema rentable o de fácil implementación,

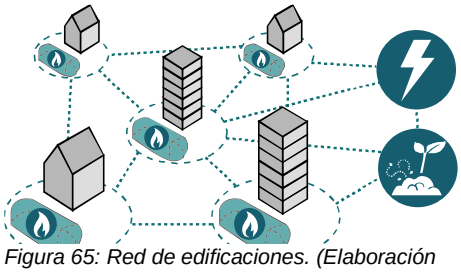


Figura 65: Red de edificaciones. (Elaboración propia)

se recomienda buscar la integración de edificaciones, con el fin de establecer redes colaborativas que contribuyan a la sostenibilidad local al interior de las ciudades.

- Evaluar la posibilidad de integrar las energías alternativas al sistema nacional de energía, buscando incentivos para las edificaciones que generen su propia energía.
- Promover la inclusión del aprovechamiento de residuos y las energías alternativas dentro de la educación profesional, apuntando a la eficiencia de las ciudades y edificaciones.

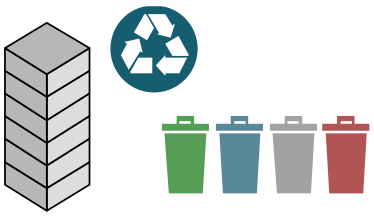


Figura 66: Reciclaje. (Elaboración propia)

Se recomienda involucrar un equipo multidisciplinar, para el desarrollo de un sistema replicable de biodigestores aplicado a edificaciones, para abordar a mayor profundidad variables y tecnologías de la digestión anaerobia, considerando la complejidad del proceso y su aplicación.

Para el proceso de digestión anaerobia, existen variables como los niveles de luz y su relación con la producción de biogás que no han sido registrados de forma rigurosa, dejando la posibilidad de trabajar esta variable en investigaciones futuras más específicas.

La poca disponibilidad de tecnologías de reactores anaerobios de alta tasa, como: reactores de lecho fluidizado, filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) y reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA), hacen que la aplicación de este tipo de tecnologías no sea considerada aún para el tratamiento de RSO, se recomienda profundizar en este tipo de tecnologías para evaluar las relaciones costos-beneficio.

Bibliografía

Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2011). A Brief History of Anaerobic Digestion BIOGAS. En *Biogas Energy* (págs. 11-23). Springer New Yor. Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4614-1040-9_2

Adekunle, K., & Okolie, J. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*(6), 205-212. Recuperado el 23 de Febrero de 2017, de http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=55061

Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Estudio Básico del Biogás.* Andalucia. Recuperado el 14 de 05 de 2017, de https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf

Alcaldía de Bogotá. (1991). LEY 3 DE 1991 (Enero 15). Recuperado el 08 de 03 de 2016, de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1164

Alcaldía de Medellín. (2006). PLAN PARCIAL DE MEJORAMIENTO INTEGRAL DEL BARRIO MORAVIA DOCUMENTO TÉCNICO. Medellín, Colombia. Recuperado el 4 de Abril de 2017, de Plan Parcial de Mejoramiento Integral del Barrio Moravia Documento Técnico

Arango Escobar, G. (2006). MORAVIA UNA HISTORIA DE MEJORAMIENTO URBANO. *Semiario Internacional: Procesos Urbanos Informales*. Recuperado el 4 de Abril de 2017, de http://www.bdigital.unal.edu.co/3129/1/GAE-MORAVIA.pdf

Area Metropolitana del Valle de Aburrá. (2015). *Política publica de Construcción Sostenible.* Medellín. Recuperado el 10 de 05 de 2016, de http://www.metropol.gov.co/ConstruccionSostenible/Documents/PPCSILineaBase27112015.pdf

Aristizábal Z., B. H., Vanegas C., E., Mariscal M., J. P., & Camargo V. (Diciembre de 2015). Digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones de. (U. N. Colombia, Ed.) *Energética*(46), 29-36. Recuperado el 5 de Marzo de 2017, de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147043932005

ASPROINCA. (2016). *FAO.org.* Obtenido de http://www.fao.org/bioenergy/26373-03e45339f2f01ddfe23346f49f27385f2.pdf

Baños, E. (Septiembre de 2010). Simulación De Una Cogeneración Basada En Microturbinas De Biogas En Una E.D.A.R. Urbana. Cartagena.

Barrientos Verjel, W. A., & Blanco Peñarete, A. (2010). Estudio de Factibilidad técnica y financiera del uso del uso del biogás obtenido del excremento de ganado para

suplir necesidades energéticas en el sector rural. Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 10 de Febrero de 2017, de http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2990/2/136179.pdf

Bertalanffy Von, L. (1968). *Teoría General de los Sistemas* (Séptima ed.). (J. Almela, Trad.) Mexico: Editorial Fondo de Cultura Económica. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de https://cienciasyparadigmas.files.wordpress.com/2012/06/teoria-general-de-los-sistemas-_-fundamentos-desarrollo-aplicacionesludwig-von-bertalanffy.pdf

BID: Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: un análisis teórico práctico.* Buenos Aires. Recuperado el 27 de 10 de 2017, de https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8202/Generacion-de-electricidad-a-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos-Un-analisis-teorico-practico.PDF?sequence=1

Bolívar Fúquene, H. E., & Ramírez Hernández, E. Y. (2012). Propuesta Para El Diseño De Un Biodigestor Para El Aprovechamiento De La Materia Orgánica Generada En Los Frigoríficos De Bogotá. Bogotá, Colombia. Recuperado el 5 de Febrero de 2017, de http://www.udistrital.edu.co:8080/documents/138588/3154083/DOCUMENTO+FINAL.pdf

Budzianowski, W. M., & Postawa, K. (2016). enewable energy from biogas with reduced carbon dioxide footprint: Implications of applying different plant configurations and operating pressures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68*(Part. 2), 852–868. Recuperado el 4 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301885

Buenrostro, O., Cram, S., Bernache, G., & Bocco, G. (2000). La digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales. *Revista Internacional de Contaminación, 16*(1), 19-26. Recuperado el 5 de Marzo de 2017, de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37016103

C. Ngumah, C., N. Ogbulie, J., C. Orji, J., & S. Amadi, E. (22 de Noviembre de 2012). Biogas Potential Of Organic Waste In Nigeria. *Journal of Urban and Environmental, 7*(1), 110-116. Recuperado el 05 de Marzo de 2017, de http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=283227995011

Cabeza, F. (29 de Febrero de 2008). Digestión anaerobia de lodos residuales usando un reactor de manto de lodos no convencional (Tipo UASB). Mexico. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2992/cabezadevacainclan.pdf?sequence=1

Cadavid, L. S., & Bolaños, I. V. (Diciembre de 2015). Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. (U. N. Colombia, Ed.) *Energética*(46), 23-28. Recuperado el 25 de Enero de 2017, de http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/energetica/article/viewFile/46142/n46_a3_46142

California Environmental Protection Agency. (2008). *Current Anaerobic Digestion technologies used for treatment of municipal solid waste.* California, USA. Recuperado el 19 de Febrero de 2017, de http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Documents/1275/2008011.pdf

Campuzano, R., & Gonzáles, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Managment, 54*, 3-12. Recuperado el 02 de 05 de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16302483

CAPSTONE. (s.f.). *CAPSTONE*. Obtenido de https://www.capstoneturbine.com/

Carlsson, M., Holmström, D., Bohn, I., Bisaillon, M., Morgan-Sagastume, F., & Lagerkvist, A. (4 de February de 2015). Impact of physical pre-treatment of source-sorted organic fraction of municipal solid waste on greenhouse-gas emissions and the economy in a Swedish anaerobic digestion system. *Waste Management*(38), 117–125. Recuperado el 24 de Febrero de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/272098981_Impact_of_physical_pre-treatment_of_source-sorted_organic_fraction_of_municipal_solid_waste_on_greenhouse-gas_emissions_and_the_economy_in_a_Swedish_anaerobic_digestion_system

Carlsson, M., Lagerkvist, A., & Morgan-Sagastume, F. (May de 2012). The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Management*(32), 1634–1650. Recuperado el 3 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12001808

Castro, L. d., Guzmán, C., & Escalante, H. (Diciembre de 2012). Influence of Particle Size and Temperature on Methane Production From Fique's Bagasse. *ITECKNE, 9*(2), 72-77. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/293491464_Influence_of_Particle_Size_and_Temperature_on_Methane_Production_From_Fique's_Bagasse_Influencia_del_tamano_de_particula_y_la_temperatura_sobre_la_produccion_de_metano_a_partir_del_bagazo_de_fique

CDM Watch. (2010). *Manual del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).* Ministerio Federal del Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania . Recuperado el 27 de Marzo de 2017, de http://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2012/03/CDM-Toolkit_Espanol.pdf

Cenén, H. (1992). Apagón energético y cacería de brujas. *hombre y maquina*, 27-33. Obtenido de http://ingenieria.uao.edu.co/hombreymaquina/revistas/08%201993-1/Articulo%204%20H&M%208.pdf

Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process A review. *Bioresource Technology* (99), 4044–4064. Recuperado el 17 de Febrero de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407001563

Chen, Z.-J. (1987). Biogas Development in China. *Poultry Science*(66), 951-953. Recuperado el 28 de Marzo de 2017, de

http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.880.4404&rep=rep1&type=pdf

Chiappe de Villa, M. L. (1999). *La política de vivienda de interés social en Colombia en los noventa.* Santiago de Chile: Naciones Unidas. Recuperado el 08 de 03 de 2016, de http://archivo.cepal.org/pdfs/1999/S995336.pdf

Christy, P. M., Gopinath, L., & Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(34), 167–173. Recuperado el 19 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001671

Chynoweth, D., Turick, C., Owens, J., Jerger, E., & Peck, M. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy, 5*(1), 95-111. Recuperado el 22 de Noviembre de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0961953493900102

Cooperación Transfronteriza España-Portugal. (2010). *Informe Complementario Sobre El Estudio De Soluciones Viables Para El Aprovechamiento Del Biogas En Extremadura En El Marco Del Proy. De Cooperación Transfronteriza España-Portugal.* Union Europea, Extremadura. Recuperado el 22 de Febrero de 2017, de http://www.altercexa.eu/images/archivos/Areas%20Tematicas/Biogas/Estudio%20BIOGAS.pdf

DANE. (2005). *Boletín Censo general 2005 deficit de vivienda.* Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado el 16 de 04 de 2016, de http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/Bol_deficit_vivienda.pdf

Davidsson, Å., Gruvberger, C., H.Christensen, T., Hansen, T. L., & Jansen, J. l. (2007). Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management, 27*(3), 406-414. Recuperado el 22 de 10 de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06000730

Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources.* Weinheim: WILEY-VCH . Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de http://197.14.51.10:81/pmb/ENERGETIQUE/energie%20renouvlables/Biogas%20from%20Waste%20and%20Renewable%20Resources%20An%20Introduction.pdf

Empresas Varias de Medellín E.S.P. (27 de Marzo de 2017). *globalmethane.* Obtenido de www.globalmethane.org

epm. (10 de 10 de 2017). *epm*. Obtenido de http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogaresypersonas/Gasnatural/Tipsdeusointeligente.aspx

European Biomass Asociation AEBIOM. (2015). *A Biogas Road Map for Europe.* Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de https://www.americanbiogascouncil.org/pdf/euBiogasRoadmap.pdf

FAO. (2011). *Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Colombia.* Bogotá. Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de http://www.fao.org/docrep/019/as419s/as419s.pdf

Ferrer, Y., & Pérez, H. (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 43*(1), 9-20. Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120681002.pdf

García, M., Espinosa, J. R., Jiménez, F., & Parra, J. D. (2013). *Separados y Desiguales: Educación y clases sociales en Colombia.* Centro de Estudios de Derecho, Justicia y Sociedad. Bogotá: dejusticia. Recuperado el 11 de 10 de 2017, de https://www.dejusticia.org/wp-content/uploads/2017/04/fi_name_recurso_591.pdf

Giraldo, J. S., Preckel, P. V., & Gotham, D. J. (2013). *An Assessment of the Potential for Electricity Generation in Indiana from Biogas Resources.* State Utility Forecasting Group. Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de https://www.purdue.edu/discoverypark/sufg/docs/publications/SUFG_Biogas.pdf

Girardet, H., & Mendoça, M. (2009). *A Renewable World: Energy, Ecology, Equality.* Londres: Green Books Ltd.

Gonçalves Ferreira, L. C. (2013). *EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD ANAEROBIA DE RESIDUOS ORGÁNICOS PRE-TRATADOS TÉRMICAMENTE.* Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, Valladolid. Recuperado el 27 de Febrero de 2017, de https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/4439/1/TESIS476-140226.pdf

González Cabrera, A. M. (s.f.). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anerobia.* Tesis maestría, Sevilla. Recuperado el 22 de Marzo de 2017, de https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/27048/TFM%20Gonz%C3%A1lez%20Cabrera%2c%20Ana%20Mar%C3%ADa%20-%20copia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Guardado Chacón, J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas.* La Habana, Cuba: CubaSolar. Recuperado el 12 de Febrero de 2017, de http://www.ideassonline.org/public/pdf/CUBASOLAR_Diseno_y_construccion_de_plantas_de_biogas.pdf

Guerra, M. (Agosto de 2011). Diseño y construcción de un biodigestor en la Universidad Don Boscoso. *Ing-novación*(2), 33-53. Recuperado el 7 de Marzo de 2017, de http://rd.udb.edu.sv:8080/jspui/bitstream/11715/513/1/4.%20Diseno%20y%20construccion%20de%20un%20biodigestor%20en%20la%20Universidad%20Don%20Bosco.pdf

Guevara Vera, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Lima, Perú. Recuperado el 7 de Febrero de 2017, de http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf

H. Gerardi, M. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters.* New Jersey: WASTEWATER MICROBIOLOGY SERIES. Recuperado el 13 de Marzo de 2017, de https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=53abcd45cf57d740608b4667&assetKey=AS%3A273548914954242%401442230551468

He, P. (2010). Anaerobic digestion: An intriguing long history in China. *Waste Management*(30), 549–550. Recuperado el 08 de Marzo de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/41101787_Anaerobic_digestion_An_intriguing_long_history_in_China

Hernandez Sampieri, R., & Fernandez Collado, C. (2010). Metodología De La Investigación. Capitulo 3: Planteamiento Del Problema Cuantitativo. En *Metodología De La Investigación* (Quinta ed., Vol. 2, págs. 32-48). Mexico D.F.: Mc Graw Hill.

Huerga, I. R., Butti, M., & Venturelli, L. (2014). *Biodigestores de pequeña escala: Un análisis práctica sobre su factibilidad.* Oliveros, Santa Fé, Argentina: INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Recuperado el 2 de Marzo de 2017, de http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/26-Biodigestor-Familiar.pdf

Hulshoff, P. (1987). Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodo UASB: manual del curso. En U. d. Ambiental, .. A. Cauca, & .. U. Wageningen.. Recuperado el 22 de Marzo de 2017, de http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866e.pdf

ICAITI. (1988). *Digestor Para Biogas Construcción Convencional.* Instituto Centroamericano De Investigacion Y Tecnología Industrial -Icaiti-, Guatemala. Recuperado el 10 de Marzo de 2017, de http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABE799.pdf

Ingreso al Area. (2016). Obtenido de http://ingresoalarea.datecno.net/2016/05/09/que-es-un-area-metropolitana-del-valle-de-Aburrá/

IPPC Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report.* Recuperado el 15 de 10 de 2017, de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

J. Themelis, N. (Agosto de 2011). *www.seas.columbia.edu.* (C. University, Ed.) Recuperado el 13 de 11 de 2016, de http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ganfer_thesis.pdf

Kossmann, W., Ponitz, U., Habermehl, S., Hoerz, T., Krämer, P., Klingler, B., . . . Euler, H. (2007). *Biogas Digest* (Vol. I). ISAT Information and Advisory Service on Appropriate Technology. Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de http://biogas.ifas.ufl.edu/ad_development/documents/biogasdigestvol1.pdf

Kumar, S. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production Principles and Applications.* New Delhi, India: Wiley-BlackWell.

Ley 142 de 1994. (s.f.). Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

López Martinez, G. (2003). Biodigestión Anaerobia De Residuos Sólidos Urbanos. *Tecnura, 7*(13). Recuperado el 22 de Febrero de 2017, de http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/6187

López Martínez, G. (1999). METODO NO CONVENCIONAL DE MEDICIÓN DE GASES EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. Recuperado el 5 de Febrero de 2017, de

http://cidc.udistrital.edu.co/investigaciones/documentos/revistacientifica/rev5/vol1/1Gases.pdf

Lorenzo Acosta, Y. L., & Obaya Abreu, M. C. (20 de 11 de 2016). La digesti´n anaerobia. Aspectos técnicos. Parte I. (I. C. Azucar, Ed.) *ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azucar*, 35-48. Obtenido de www.redalyc.org: http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf

Lusk, P. (1998). *Methane Recovery from Animal Manures the curren Opportunities casebook.* Golden, Colorado, EEUU. Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25145.pdf

Lyberatos, G., & Skiadas, V. I. (1999). MODELLING OF ANAEROBIC DIGESTION - A REVIEW. *Global Nest*(2), 63-76. Recuperado el 18 de Febrero de 2017, de http://journal.gnest.org/journal-paper/modeling-anaerobic-digestion-review

Martí-Herrero, J., Pino, M., G.-M. L., Pedraza, G. X., & Rodríguez, L. (2016). *Oportunidades para el desarrollo de un sector sostenible de.* Recuperado el 18 de Marzo de 2017, de http://www.cipav.org.co/pdf/BiodigestoresRedBioLAC.pdf

Mehraj Pasha, K., Akram, A., Narasimhulu, K., & Kodandaramaiah, G. N. (March de 2015). Waste Management by Anaerobic Digestion of Kitchen Waste- A Review. *International Journal of Innovative Research in Science, 4*(3). Recuperado el 17 de Febrero de 2017, de https://www.rroij.com/open-access/waste-management-by-anaerobic-digestion-ofkitchen-waste-a-review.pdf

Methane to Markets. (Marzo de 2008). *globalmethane*. Recuperado el 21 de 10 de 2017, de https://www.globalmethane.org/documents/methane_fs_spa.pdf

Methane to Markets. (Marzo de 2008). La importancia del metano y las actividades de reducción de sus emisiones. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de https://www.globalmethane.org/documents/methane_fs_spa.pdf

Min. de Energía Chile. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS.* Programa de las Naciones Unidas, Santiago de Chile. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial DNP -DDUPA. (24 de Agosto de 2009). Documento CONPES. *Lineamientos para la consolidación de la Política de Mejoramiento Integral de Barrios - MIB.* Bogotá. Obtenido de http://www.minvivienda.gov.co/Mejoramiento%20Integral%20de%20Barrios/Lineamientos%20para%20la%20Consolidaci%C3%B3n%20de%20la%20Pol%C3%ADtica%20de%20MIB.pdf

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Manual de Recolección y Transporte de los Residuos Sólidos.* Obtenido de http://ambiente.gob.do/wp-content/uploads/2016/10/03-Recolecci%C3%B3n-y-Transporte-RS.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2007). *Plan Energético Nacional.* Bogota: Teresa Huertas Molina. Recuperado el 19 de 05 de 2016, de http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=39201284

Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. (2010). *Proyección de Demanda de Energía en Colombia revisión Octubre de 2010.* Bogotá. Recuperado el 05 de 03 de 2016, de

file:///D:/LIBROS/Colombia%20informes/PROYECC_DEMANDA_ENERGIA_OCTUBRE_2010.pdf

Ministerio de Vivienda. (2014). *Colombia: Cien años de políticas habitacionales.* Bogotá. Recuperado el 08 de 03 de 2016, de http://www.minvivienda.gov.co/Documents/100anosdepoliticashabitacionales.pdf

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2012). TÍTULO F Sistemas de Aseo Urbano. En *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS* (pág. 264). Bogotá, Colombia. Recuperado el 17 de Abril de 2017, de http://camacol.co/sites/default/files/IT-Reglamentos/Anexo%20T%C3%A9cnico%20RAS-2000%20T%C3%ADtulo%20F.pdf

MINVIVIENDA. (2015). *www.minvivienda.gov.co*. Recuperado el 15 de 05 de 2016, de http://www.minvivienda.gov.co/cambio-climatico/mitigacion/construccion-sostenible

Molina Tirado, K. G., Restrepo Vélez, N. A., Moreno Toro, V., & Sánchez Restrepo, V. (2016). *Determinación A Escala Laboratorio De La Relación Sustrato/Inóculo En La Biodigestión De Residuos Rgánicos De La Universidad Eafit.* Universidad EAFIT, Medellín. Recuperado el 22 de Marzo de 2017, de https://www.acofipapers.org/index.php/eiei2016/2016/paper/view/1780/677

Montoya Restrepo, J. I., C. G., Flecha Quintanilla, O., Viadé Andavert, D., Gallegos Dávalos, Á., & Morató Farreras, J. (Junio de 2011). Moravia como ejemplo de transformación de áreas urbanas degradadas tecnlogias para cuencas hidrograficas. *Ciencias Biomédicas, 9*(15), 38-49. Recuperado el 4 de Abril de 2017, de http://www.catedramedellinbarcelona.org/newsletter/mayo2012/pdf/articuloNOVA15.pdf

Mulinda, C., Hu, Q., & Pan, K. (2013). Dissemination and Problems of African Biogas Technology. *Energy and Power Engineering*(5), 506-512. Recuperado el 24 de Marzo de 2017, de http://file.scirp.org/pdf/EPE_2013102410394221.pdf

Müller, C. (2007). *Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle-Income Countries.* Eawag Aquatic research, Dübendorf. Recuperado el 4 de Marzo de 2017, de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/Mueller_2007.pdf

Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchi, A. (2012). *Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases efecto invernadero, durante la fase de construcción. Caso de estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile.* Santiago: Revista de la Construcción vol.11 no.3. Recuperado el 17 de 09 de 2016, de http://www.scielo.cl/pdf/rconst/v11n3/art11.pdf

Nalinga, Y., & Legonda, I. (Marzo de 2016). The Effect of Particles Size on Biogas Production. *International Journal of Innovative Research in Technology & Science, IV*, 5. Recuperado el 3 de 03 de 2017, de http://ijirts.org/volume4issue2/IJIRTSV4I2002.pdf

Nopharatanaab, A., Pullammanappallilac, P., & Clarke, W. P. (2007). Kinetics and dynamic modelling of Batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor. *Waste Management, 27*(5), 595-603. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06001346

NSWMA National Solid Wastes Management Association. (2006). *Modern Landfills: a far cry from the past.* Washington, EEUU. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de http://beginwiththebin.org/images/documents/for-education/white-paper-landfill.pdf

Odum, E. P. (1986). *Fundamentos de Ecología* (Primera ed.). (T. d. edición, Trad.) Mexco DF: Nueva Editorial Interamericana S.A. de C.V.

Olaya Arboleda, Y., & Gonzáles Salcedo, L. O. (2009). *Fundamentos para el diseño de Biodigestores.* Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

ONU. (1948). *Declaración Universal de los derechos humanos.* Recuperado el 10 de 05 de 2016, de http://www.un.org/es/documents/udhr/

ONU HABITAT. (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011.* Londres: Earthscan Ltd,. Obtenido de http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=1165&Itemid=538

Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy Jr., J. B., Young, L. Y., & McCarty, P. L. (19 de December de 1978). Biossay for monitoring biochemical methane potential and anerobic toxicity. *Water Research, 13*, 485-492. Recuperado el 14 de Febrero de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135479900435

Owens, J. M., & Chynoweth, D. P. (1993). Biochemical Methane Potential of Municipal Solid Waste (MSW) Components. *Water Science and Technology*, 1-14. Recuperado el 18 de Noviembre de 2017, de http://wst.iwaponline.com/content/27/2/1

Pacheco Gonzáles, S. I. (2016). Construcción Y Evaluación De Un Digestor Anaerobio Para La Producción De Biogás A Partir De Residuos De Alimentos Y Poda A Escala Banco. Manizales, Caldas, Colombia. Recuperado el 20 de Febrero de 2017, de http://www.bdigital.unal.edu.co/51702/

Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cardenas, L., Vásquez, C., Torres, W., & Ordoñez, J. (Diciembre de 2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico. *Ingeniería Investigación y Tecnología, XVI*(4), 515-526. Recuperado el 22 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774315000372

Pathak, J., & Srivastava, R. (2007). Determination Of Inoculum Dose For Methane Production From Food Industry Effluent. *Jr. of Industrial Pollution Control*(23), 49-54. Recuperado el 22 de Marzo de 2017, de http://www.icontrolpollution.com/articles/determination-of-inoculum-dose-for-methane-production-from-food-industry-effluent-.pdf

Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gomez, E. (1991). KINETICS OF ANAEROBIC TREATMENT. *Wal. Sci. Tech., 24*(8), 35-59. Recuperado el 18 de Marzo de 2017, de http://wst.iwaponline.com/content/24/8/35

Pehme, S., & Veromann, E. (2015). Environmental consequences of anaerobic digestion of manure with different co-substrates to produce bioenergy: A review of life cycle assessments. *Agronomy Research*(13), 372–381. Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de http://agronomy.emu.ee/vol132/13_2_12_B5.pdf

PGIRS AMVA. (2006). *Formulación del Plan de Gestión Integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá - PGIRS Regional.* Formulación del Plan de Gestión Integral de residuos sólidos regional del Valle de Aburrá - PGIRS Regional, Medellín. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de http://www.metropol.gov.co/Residuos/Documents/PGIRS/Cap.%20III%20Diagn%C3%B3stico.pdf

Phun Chien Bong, C., Shin Ho, W., Hashim, H., Shiun Lim, J., Siong Ho, C., Soo Peng Tan, W., & Tin Lee, C. (Abril de 2017). Review on the renewable energy and solid waste management policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70*, 988–998. Recuperado el 5 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116310644

Pike Research. (2012). *Renewable Biogas Methane Recovery and Utilization in Landfills and Anaerobic Digesters: Municipal Solid Waste, Agricultural, Industrial, and Wastewater Market Analysis and Forecasts.* Obtenido de http://www.navigantresearch.com/wp-content/uploads/2012/06/BGAS-12-Brochure.pdf

PSE PROBIGAS. (2009). *Manual del estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales.* Gobierno de España. Recuperado el 25 de Febrero de 2017, de http://canseixanta.cat/zi.arxiu/apergas.cat/textweb/00000070/PROBIOGAS_Manual%20de%20Estado%20del%20Arte.pdf

Quanguo, Z., Jianjun, H., & Duu-Jong, L. (19 de February de 2016). Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates. *Renewable Energy*(98), 108e119. Recuperado el 4 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116301306

Raboni, M., & Urbini, G. (Junio de 2014). Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 9*(2). Recuperado el 8 de Marzo de 2017, de http://www.scielo.br/pdf/ambiagua/v9n2/v9n2a02.pdf

Ramírez Rodriguez, L. D. (Diciembre de 2004). Generación eléctrica por medio de biogás. Costa Rica. Recuperado el 8 de Febrero de 2017, de http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0426t.pdf

Raposo, F., De la Rubia, M., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in Batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16), 861–877. Recuperado el 23 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004588

Regional Information Service Center for South East Asia on Appropriate Technology. (Noviembre de 1998). *Review of Current Status of Anaerobic Digestion Technology for Treatment of Municipal Solid Waste.* Recuperado el 02 de 03 de

2017, de F.d. Institutionen för mark- och vattenteknik: http://rymd.lwr.kth.se/grundutbildning/ae2301/impegax/reading/Waste/ANAEROBIC_DIGESTION_TECHNOLOGY/Adreview.pdf

Rodríguez Miranda, N. A. (2010). Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio de bienestar universitario. Bucaramanga, Colombia. Recuperado el 8 de Febrero de 2017, de http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2991/2/136180.pdf

Rodríguez Perdigón, L. A. (Septiembre de 2014). Viabilidad Técnica Para Producción De Biogás A Partir De La Fracción Orgánica De Los Residuos Sólidos Urbanos – FORSU. Bogotá, Colombia. Recuperado el 27 de Febrero de 2017, de http://repository.ean.edu.co/handle/10882/1560

Rojas, J. F. (16 de Enero de 2016). Colombia entierra millones de pesos por no reciclar. *El Colombiano*. Recuperado el 21 de Abril de 2017, de http://www.elcolombiano.com/especiales/que-hacer-con-la-basura/colombia-entierra-millones-de-pesos-por-no-reciclar-FD3410601

Rozo, C. Y. (2014). Cálculo del costo para el componente de recolección y transporte de residuos sólidos. Avances de investigación sobre el servicio público de aseo. (J. A. Lizcano Caro, Ed.) *Tecnodigestión, XI*(1). Obtenido de http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/8288/10710

Sárvári Horváth, I., Tabatabaei, M., Karimi, K., & Kumar, R. (2016). Recent updates on biogas production - a review. *Biofuel Research Journal, 10*, 394-402. Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/303742783_Recent_updates_on_biogas_production_-_a_review

Scano, E., Asquer, C., Pistis, A., Ortu, L., Demontis, V., & Cocco, D. (2014). Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. *Energy Conversion and Management*, 22-30. Recuperado el 17 de Noviembre de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/278114853_Biogas_from_anaerobic_digestion_of_fruit_and_vegetable_wastes_Experimental_results_on_pilot-scale_and_preliminary_performance_evaluation_of_a_full-scale_power_plant

Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Mofor, L. (Octubre de 2015). Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1269-1286. Recuperado el 5 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115005389

Schnürer, A., & Jarvis, Å. (2010). *Microbiological Handbook for Biogas Plants.* (S. W. Management, Ed.) Malmö, Suecia. Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de http://www.eac-quality.net/fileadmin/eac_quality/user_documents/3_pdf/Microbiological_handbook_for_biogas_plants.pdf

Shah, A., Mahmood, Q., Rashid, N., Pervez, A., & Raja, A. (2015). Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42*, 627-642. Recuperado el 10 de Octubre de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008788

Siles, F. A. (21 de Junio de 2012). Generación de energía eléctrica a partir de producción de biogás. Mexico D.F. , Mexico. Recuperado el 8 de Febrero de 2017, de http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10549/136.pdf?sequence=1

Silva Lopes, W., Duarte Leite, V., & Prasad, S. (Enero de 2004). Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. *Bioresource Technology* (94), 261–266. Recuperado el 22 de Marzo de 2017, de http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852404000239

Tavizón Alvarado, E. P. (Julio de 2010). Diseño de un biodigestor para desechos orgánicos de origen vegetal. Ciudad Juárez, Mexico. Recuperado el 05 de Febrero de 2017, de http://mwm.cimav.edu.mx/wp-content/uploads/2015/04/Tesis-Tavizon-Alvarado-Eva-Patricia.pdf

Unidad de Planación Minero Energética - UPME. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2012). *"Determinación de propiedades físiscas y, estimación del consumo energético en la producción, de acero, concreto, vidrio, ladrillo y otros materiales, entre ellos los alternativos y otros de uso no tradicional, utilizados en la construcción de edificacion.* Informe Final, Santiago de Cali. Recuperado el 11 de 03 de 2016, de file:///D:/LIBROS/Colombia%20informes/DETERMINACI%C3%93N%20DE%20PROPIEDADES,%20ESTIMACI%C3%93N%20CONSUMO%20ENERGETICO%20DE%20MAT%20UTILIZADOS%20EN%20EDIFICACIONES%20COLOMBIANAS.pdf

Unión Temporal Universidad Nacional-Fundación Bariloche-Política Energética. (2010). *Análisis y revisión de los objetivos de política energética colombiana de largo plazo y actualización de sus estrategias de desarollo.* Recuperado el 27 de 02 de 2016, de http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN%202010%20VERSION%20FINAL.pdf

United States Enviromental Protection Agency. (24 de Marzo de 2017). *Enviromental Protection Agency EPA.* Obtenido de https://www.epa.gov/agstar/agstar-data-and-trends#statedata

UPME. Unidad de Planeación Minero Energética. (2015). *PLAN ENERGÉTICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050.* Bogotá. Recuperado el 05 de 03 de 2016, de http://www.upme.gov.co/Docs/PEN/PEN_IdearioEnergetico2050.pdf

Uyaszewski, S., Mamouneas, T., Shen, W.-K., Rosenthal, P. J., Woodward, J. R., Cirillo, V. P., & Edmunds, L. N. (Mayo de 1997). Light Effects in Yeast: Evidence for Participation of Cytochromes in Photoinhibition of Growth and Transport in Saccharomyces cerevisiae Cultured at Low Temperatures. *JOURNAL OF BACTERIOLOGY,, 138*(2), 523-529.

Wolman, A. (1965). The Metabolism of Cities. Recuperado el 15 de Febrero de 2017, de http://www.irows.ucr.edu/cd/courses/10/wolman.pdf

World Banck. (2012). *What a Waste: A global review of solid waste mangement.* Washington. Recuperado el 10 de 10 de 2017, de http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf

WWF. (2011). *EL INFORME DE LA ENERGÍA RENOVABLE.* WWF. Obtenido de http://www.wwf.org.co/?199641/Informe-de-la-Energa-Renovable

Xu, S., He, H., & Luo, L. (2016). Status and Prospects of Municipal Solid Waste to Energy Technologies in China. *Recycling of Solid Waste for Biofuels and Bio-Chemicals, XIV*, 31-54. Recuperado el 14 de Marzo de 2017, de https://www.google.com.co/webhp?sourceid=chrome-instant&rlz=1C1CHZL_esCO721CO722&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#