

**“VALORACION DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS DURANTE UN
PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA CON CONTENIDO RUMINAL DE
ORIGEN BOVINO BAJO CONDICIONES DE TIEMPO, CARGA Y
TEMPERATURA DIFERENCIALES”**

GLORIA CONSUELO RAMÍREZ SÁNCHEZ

TRABAJO DIRIGIDO POR:
CARLOS ARTURO GRANADA

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONÓMICAS Y
ADMINISTRATIVAS
MAESTRIA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE

MANIZALES COLOMBIA

2016

AGRADECIMIENTOS

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece” Filipenses 4:13

Gracias a Dios padre celestial, a mis hijos Nicolás y Esteban por ser mi principal motivación y apoyo.

Al profesor German Arturo López, director del grupo de investigación Energías alternativas Facultad Tecnológica Universidad Distrital Francisco José de Caldas por su colaboración y asesoría.

Al profesor Carlos Arturo Granada por su apoyo permanente durante el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE CUADROS	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
RESUMEN / ABSTRACT	9
PALABRAS CLAVE	9
INTRODUCCIÓN	10
1. EL PROBLEMA	
1.1. Planteamiento del problema.....	12
1.2. Objetivos: General y Específicos.....	15
1.3. Hipótesis.....	16
1.4. Pregunta de investigación.....	16
1.5. Justificación.....	16
2. MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	18
2.2. Bases Teóricas.....	19
2.2.1. Biomasa.....	19
2.2.2. Contenido ruminal.....	20
2.2.3. Utilización de la Biomasa.....	22
2.2.4. Digestión Anaerobia.....	23
2.2.5. Biogás.....	24
2.2.6. Biodigestores.....	25
2.3. Marco de antecedentes.....	27
2.4. Marco Geográfico.....	29
2.5. Marco Institucional.....	29

2.6. Marco Legal.....	32
3. METODOLOGÍA	
3.1. Población/Muestra.....	33
3.2. Tipo/Diseño de investigación.....	33
3.3. Materiales/ Equipos.....	35
3.4. Técnicas de análisis.....	36
3.4.1. Caracterización.....	37
3.4.1.1. Densidad.....	37
3.4.1.2. Humedad.....	37
3.4.1.3. Cenizas.....	38
3.4.1.4. Material Volátil.....	39
3.4.1.5. PH.....	40
3.4.1.6. DQO.....	40
3.4.1.7. Tinción Gram.....	41
3.4.2. Biodigestor.....	42
3.4.2.1 Biodigestor tipo Batch.....	43
3.5. Procedimiento.....	45
3.5.1 Temperatura y Presión.....	45
3.5.2. Calentamiento.....	45
3.5.3. Gasómetro y Sistema de purificación del biogás.....	45
3.5.4. Recolección del Biogás y Prueba de Llama.....	48
4. RESULTADOS Y ANALISIS	
4.1. Caracterización del contenido ruminal.....	50
4.1.1. Químicas.....	51
4.1.2. Físicas.....	52

4.1.3. Microbiológicas.....	52
4.2. Sistema de biodigestion anaerobio bajo condiciones de laboratorio.....	53
4.2.1 Biodigestores.....	53
4.2.2. Calibración.....	54
4.2.3. Gasómetro.....	55
4.2.3.1. Prueba 1.....	56
4.2.3.2. Prueba 2.....	58
4.2.3.3. Prueba 3.....	60
4.2.3.4. Prueba 4.....	61
4.2.4. Prueba de llama.....	63
4.3. Eficiencia del proceso de digestión anaerobia.....	64
5. DISCUSION DE RESULTADOS.....	68
6. CONCLUSIONES.....	70
6. RECOMENDACIONES.....	72
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
8. ANEXOS.....	80

LISTA DE CUADROS

Cuadro1. Correlación volúmenes prueba1 (50/50 – 31,5°C).

Cuadro2. Correlación volúmenes prueba2 (70/30 – 31,5°C).

Cuadro 3. Correlación volúmenes prueba3 (50/50 – 36,5°C).

Cuadro 4. Correlación volúmenes prueba1 (70/30 – 36,5°C).

Cuadro 5. Correlación volúmenes acumulados.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Parámetros de control
- Tabla 2. Componentes del Biogás en función del sustrato utilizado.
- Tabla 3. Resultados caracterización de la Biomasa. Autor
- Tabla 4. Materiales y equipos.
- Tabla 5. Variables medidas.
- Tabla 6. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 1.
- Tabla 7. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 1.
- Tabla 8. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 1.
- Tabla 9. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 2.
- Tabla 10. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 2.
- Tabla 11. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 2.
- Tabla 12. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 3.
- Tabla 13. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 3.
- Tabla 14. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 3.
- Tabla 15. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 4.
- Tabla 16. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 4.
- Tabla 17. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 4.
- Tabla 18. Resultados Cromatografía de gases.
- Tabla 19. Promedio de biogás generado. Doce ensayos.
- Tabla 20. Frecuencia Acumulada. Prueba 1.
- Tabla 21. Frecuencia Acumulada. Prueba 2.
- Tabla 22. Frecuencia Acumulada. Prueba 3.
- Tabla 23. Frecuencia Acumulada. Prueba 4.
- Tabla 24. Resultado análisis estadístico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zonas No Interconectadas de Colombia.

Figura 2. Biomasa.

Figura 3. Estómago Bovino.

Figura 4. Procesos de conversión energética de Biomasa.

Figura 5. Rutas digestión anaerobia.

Figura 6. Biodigestor Discontinuo.

Figura 7. Biodigestor Semicontinuo.

Figura 8. Biodigestor Continúo.

Figura 9. Biodigestor Bach

Figura 10. Producción Bovinos.

Figura 11. Sacrificio Bovinos.

Figura 12. Diseño Metodológico

Figura 13. Bolsas Tedlar.

Figura 14. Partes Cromatógrafo de gases.

Figura 15. Municipio de Nocaima y plaza de mercado.

Figura 16. Proceso determinación densidad.

Figura 17. Proceso humedad.

Figura 18. Determinación ceniza.

Figura 19. Determinación material volátil.

Figura 20. Determinación pH.

Figura 21. Determinación DQO

Figura 22. Tinción Gram

Figura 23. Calentamiento Biodigestores Laboratorio.

Figura 24. Biodigestores Laboratorio.

Figura 25. Horno Memmet

Figura 26. Gasómetro.

Figura 27. Purificador de H₂S.

Figura 28. Purificador de CO₂

Figura 29. Sistema para medir volumen de gas por desplazamiento

Figura 30. Sistema de Purificación.

Figura 31. Prueba de llama.

Figura 32. Sistema de recolección de gas para llevar al Cromatógrafo de gases.

Figura 33. Adaptación Biodigestores.

Figura 34. Cargue Biodigestores

Figura 35. Sellado Biodigestores

Figura 36. Ensayo de la llama

Figura 37. Cromatógrafo de gases UN

RESUMEN

Este trabajo procuró valorar la producción de biogás, utilizando como materia prima (biomasa) un residuo del proceso de beneficio animal (contenido ruminal de origen bovino) realizando cuatro pruebas por triplicado mediante un procedimiento a nivel de laboratorio, durante periodos de tiempo de 30 días y variando el porcentaje de carga (rumen/ agua) y la temperatura en cada montaje. En la etapa inicial del proyecto se realizó la caracterización físico química y microbiológica del contenido ruminal de origen bovino, esta caracterización permitió tomar decisiones para la siguiente etapa; selección del biodigestor adecuado y condiciones generales para realizar el proceso de digestión anaerobia.

Para cuantificar la cantidad de biogás generado se aplicó el principio de desplazamiento de agua en un gasómetro; midiendo y tabulando los datos obtenidos. Con base en estos resultados se determinó bajo que condiciones de porcentaje de carga y rango de temperatura se permite generar mayor cantidad de biogás. Para la cualificación del biogás se realizó análisis de cromatografía de gases por triplicado para determinar el porcentaje de metano presente en cada muestra que se analizó.

ABSTRACT

This study sought to evaluate the production of biogas, using as raw material (biomass) waste process profit animal (bovine rumen contents) by performing four tests in triplicate by a process in the laboratory, for periods of 30 days and varying the load percentage (rumen / water) and temperature in each assembly. In the initial stage of the project the chemical and physical characterization of microbiological bovine rumen contents was performed, this characterization allowed to make decisions for the next stage; Selecting the right digester and conditions for the anaerobic digestion process.

To quantify the amount of biogas generated the principle of water displacement in a gasometer was applied; measuring and tabulating the data. Based on these results it was determined under what conditions percentage loading and temperature range can generate as much biogas. For qualification of biogas gas chromatography analysis was conducted in triplicate to determine the percentage of methane in each sample analyzed.

PALABRAS CLAVE

Energía, biomasa, biogás, biodigestor, contenido ruminal, contaminación, residuos, impacto ambiental

INTRODUCCIÓN

La crisis ambiental que enfrenta el mundo es producto de la explotación de los recursos naturales para satisfacer la demanda del sistema económico enfocado hacia el consumo masivo (CORPOICA, 2010), y este comportamiento se ve reflejado en el daño ambiental que afecta al planeta y se encuentra inmerso en un proceso de acumulación de riqueza. El tema del cambio climático, ha llegado a ser visto a nivel global como una cuestión importante, entendiéndose que hay escasez de servicios ambientales, la energía y las materias primas son cada vez más escasas y no se está aportando en la construcción de un desarrollo sostenible.

Se hace necesario cambiar el uso de combustibles fósiles y energía hidráulica a otras fuentes alternativas, que puedan generar energía sin provocar la destrucción del medio ambiente (UPME, Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050, 2015).

Para Colombia, las energías alternativas, permiten el aprovechamiento de las ventajas geográficas y climatológicas con que cuenta el país para buscar sostenibilidad ambiental y la satisfacción de las necesidades básicas de la población, que sólo será posible a través de un nuevo paradigma de la sostenibilidad.

La integración de las energías renovables al mercado energético nacional (Colombia, 2014) es un mecanismo que permitirá cumplir los compromisos adquiridos por Colombia al firmar tratados internacionales como la reducción de emisiones atmosféricas (Protocolo de Río de Janeiro), metodologías de producción más limpia MDL y desarrollo e implementación de energías limpias (Protocolo de Kioto), esta estrategia puede ser viabilizada impulsando investigaciones en el campo de las energías alternativas, el uso y aprovechamiento del potencial de Colombia en este campo es mínimo.

El sistema interconectado no cubre las necesidades energéticas de casi la mitad del territorio nacional, la implementación de sistemas energéticos alternativos: eólicos, solares, geotérmica y biomasa son manejados a través de dos entidades adscritas al ministerio de Minas y Energía el UPME y el IPSE, que generan proyectos a pequeña escala sin dar solución de fondo al abastecimientos de energía para zonas no interconectadas. Según Fedesarrollo, la participación en la generación del país de fuentes renovables no convencionales es de menos del 1% proveniente del bagazo y el viento sumado al 4.29% proveniente de generación hidráulica menor a 20MW para un total de 4.72% (FEDESARROLLO, 2013)

Una alternativa de solución a esta problemática es la generación energética a partir de Biomasa, resuelve no solo abastecimiento energético en zonas no interconectadas de vocación agrícola y pecuaria; sino también disminuye los impactos ambientales negativos, generados por el no aprovechamiento de residuos de estas actividades. El biogás, es un gas combustible que se produce a partir de la degradación anaeróbica de residuos orgánicos, tales como residuos sólidos urbanos RSU, agrícolas, ganaderos, industriales y lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para este proyecto se valoró la producción de biogás utilizando como biomasa el contenido ruminal de origen bovino realizando pruebas en las que se cambiaban las condiciones de la digestión anaerobia (tiempo de retención, porcentaje de carga (rumen/ agua) y la temperatura, el objetivo de determinar cuáles son las condiciones que dan mayor eficiencia al proceso. A través de un tratamiento adecuado de los residuos orgánicos, es posible aprovechar el metano para generar calor y energía eléctrica.

1. PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente Colombia afronta una fuerte problemática relacionada con el desabastecimiento energético en extensas zonas del país y la sobreexplotación de los recursos hídricos dedicados a la generación hidráulica del sistema interconectado nacional, en ese contexto se hace necesario diversificar la oferta de energía implementando la generación energética a partir de fuentes renovables, para asegurar una sostenibilidad energética a futuro. De acuerdo a la Unidad de planeamiento minero energético UPME “Con el fin de promover el desarrollo de plantas de generación eléctrica a partir de la biomasa, la Ley 788 de 2002 consagró una exención en el pago del impuesto de renta generada por la venta de energía proveniente de tal fuente, para proyectos que tramiten y vendan certificados de carbono e inviertan el 50% de tales ganancias en obras de beneficio social. Por otra parte, la reciente Ley 1715 de 2014 expandió los beneficios tributarios para las FNCE, entre las que se encuentra la biomasa, con base en lo cual, la UPME proyecta en el Plan de Expansión de Referencia 2014-2028 que se podrían adicionar al parque generador del país 191 MW de biomasa de palma⁹² y 57 MW de caña en el periodo 2015-2020, que se sumarían a los 72,3 MW de biomasa que hoy entregan energía al SIN, o los cerca de 206 MW totales que suministran energía para el autoconsumo de la industria azucarera y excedentes para la venta (UPME, Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050, 2015). En este sentido es fundamental realizar proyectos de investigación que permitan avanzar sobre el conocimiento de fuentes potenciales de energía renovable, sus posibles aplicaciones y condiciones óptimas de aprovechamiento.

Alcanzar un aprovechamiento de los residuos orgánicos aporta alternativas de solución a problemas ambientales radicales, tales como el impacto negativo que se genera sobre

los ecosistemas, la emisión de gases efecto invernadero y contaminación de acuíferos. La biomasa muerta se incorpora al detritus y la materia orgánica del suelo donde es transportada a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas, se produce almacenamientos de C en el suelo que regresan el C a la atmósfera en diferentes periodos (Fernandez, 2004)

En Colombia existe un sistema de interconexión nacional eléctrico SIN, que provee el servicio de energía al 44% del país, quedando cerca del 66% como zonas no interconectadas ZNI las cuales corresponden zonas aisladas geográficamente, allí se encuentran departamentos como Amazonas, Vaupés, Guania, Choco, San Andrés y Providencia entre otras de difícil acceso (figura 1). En estas zonas habitan cerca de 1.800.000 personas. La cobertura de energía eléctrica en estas zonas es del 34% y el servicio depende en un 96% de plantas térmicas que utilizan combustibles fósiles y el restante utiliza recursos renovables (FAZNI.2012).

Existen otras zonas del país se incluyen dentro del ZNI, por otros factores como la baja demanda del servicio, deficiencia en el servicio debido a pérdidas en las redes y precario sistema de comercialización, estas regiones tampoco pueden acceder al servicio de energía y en su mayoría son población rural con una densidad poblacional muy baja, cerca de 3,05 por km².

La biodigestion es un modelo alternativo de intervención que permite solucionar el problema de desabastecimiento energético en zonas determinadas in-situ, aprovechando en forma eficiente los residuos sólidos orgánicos, las condiciones de climáticas o geográficas propias del sector, características que dan un gran valor medioambiental a estos procesos. (FEDESARROLLO. 2012)

La energía a partir de biomasa aprovecha toda sustancia orgánica renovable de origen vegetal o animal, cuando se utilizan residuos generados de actividades agropecuarias o agroindustriales y se denomina “agro energía” La producción de biocombustibles es una industria que se encuentra en expansión en el mundo a raíz de la creciente necesidad de buscar fuentes energéticas, alternas a los combustibles fósiles, más amigables con el medio ambiente (CORPOICA, 2010). Mediante cuatro procedimientos la biomasa puede ser transformada en calor o electricidad: digestión aerobia, combustión, gasificación y pirolisis, siendo la gasificación la más recomendada para generación eléctrica. La gasificación consiste en un proceso de oxidación parcial a elevada temperatura (entre 800 y 1.500 °C) mediante el cual la biomasa reacciona con cantidades limitadas de agente gasificante originando un producto gaseoso formado por diferentes proporciones de los siguientes gases: CO, H₂, CO₂, CH₄ y N₂ (Dolores Hidalgo, 2014).

Las experiencias más significativas en la cogeneración con biomasa se encuentran principalmente en la zona del valle de Cauca en ingenios azucareros” El caso del Ingenio Providencia, aproximadamente el 50% de la energía producida es consumida por el Ingenio, mientras que el resto es vendido a la red nacional de energía. El Proyecto de Cogeneración se desarrolla en las instalaciones de la empresa ubicadas en Kilometro 12 Vía Palmira – El Cerrito, Corregimiento El Placer, Jurisdicción del Municipio del Cerrito, Departamento del Valle del Cauca. Realizando el cálculo de **“las externalidades ambientales del este proceso son mínimas”**, ya se cumple el ciclo natural del carbono y no se generan otros impactos a menos que cambien los usos del suelo para realizar cultivos energéticos y realizar el proceso.

Colombia cuenta con un potencial energético mediante fuentes no convencionales muy interesante, el cual puede impulsarse mediante alianzas público privadas a fin de dar

soluciones sostenibles en materia energética, pero que además generen proyectos productivos y posibiliten el desarrollo de las zonas más apartadas del país, con una regulación de subsidios definida, con la debida planeación de los proyectos y de esta forma lograr obtener resultados exitosos.

1.2. OBJETIVOS:

Objetivo General

Objetivos específicos

1. Realizar la caracterización del contenido ruminal de origen bovino para la obtención de biogás a través de un proceso de digestión anaerobio
2. Implementar un sistema de biodigestion anaerobio bajo condiciones de laboratorio y realizar pruebas de laboratorio de un proceso de Biodigestion anaerobio para Biomasa (contenido ruminal), estableciendo como variables a controlar (temperatura y carga)
3. Determinar eficiencia del proceso de Biodigestion desde las variables temperatura y carga en términos de composición y cantidad

1.3. Hipótesis:

El contenido ruminal de origen bovino es una buena fuente de materia orgánica para realizar procesos de biodigestion anaerobia y generar biogás

1.4. Pregunta Investigativa:

¿Es posible obtener biogás a partir de un proceso de Biodigestion anaerobia de Biomasa (Contenido ruminal de origen bovino) controlando las variables carga y temperatura?

1.5. Justificación:

La industria ganadera es un renglón básico en la economía de Colombia y genera problemáticas ambientales, económicas y sociales. Las zonas de Colombia dedicadas a la ganadería alcanzan casi 40 millones de hectáreas, generando una sobreexplotación de los suelos en casi 21 millones de hectáreas ya que, de acuerdo con el mapa de uso de la tierra del IGAC, Colombia solo posee alrededor de 19 millones de hectáreas aptas para uso ganadero (IDEA. 2010). Por otra parte los subproductos del proceso de beneficio

como: sangre, pieles, huesos, heces, contenido ruminal, etc. (20% del peso vivo aproximadamente), generan impactos negativos al ambiente debido a su deficiente manejo y disposición final. Las condiciones de salubridad de los centros de beneficio no son adecuadas, poniendo en riesgo la salud de los operarios y consumidores.

En Colombia la producción de carne de bovinos sacrificados ha aumentado durante los últimos años, las zonas donde se efectuó el mayor número de sacrificios fueron Antioquia, Bogotá, Valle del Cauca. Sin embargo el aprovechamiento del contenido ruminal es mínimo, en algunos centro de beneficio es utilizada en la fabricación de abonos para la actividad agraria, muchos de estos residuos son llevados a botaderos o arrojados a fuentes hídricas locales, al ser un residuo orgánico posee el potencial para ser utilizado como materia prima para la generación de gas metano, y con esto abrir las puertas para la producción de energía eléctrica, mecánica o para el uso doméstico de los hogares. (FEDEGAN, 2015)

Un posible aprovechamiento de residuos producidos el sector agropecuario en Colombia, se enmarca dentro de las políticas gubernamentales dirigidas a la solución energética en zonas no interconectadas ZNI (Figura 1). La ley 855 de 2003 establece la ubicación de ZNI, crea el fondo de apoyo económico para zonas no interconectadas FAZNI, estas zonas cubren cerca del 30% del territorio nacional, principalmente los departamentos de Amazonas, Guajira y las zonas de la costa Pacífica y Llanos orientales. El Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas-IPSE, es un establecimiento adscrito a Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Tiene como función principal mejorar las condiciones de vida de las comunidades que se encuentran fuera del sistema interconectado nacional.



Figura 1. Zonas No Interconectadas de Colombia. UPME

2. MARCO TEÒRICO:

2.1. Antecedentes de la Investigación:

En Colombia la implementación de proyecto de energías renovables está a cargo del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas-IPSE, es un establecimiento adscrito a Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Tiene como función principal mejorar las condiciones de vida de las comunidades que se encuentran fuera del sistema interconectado nacional, que en Colombia alcanza más del 45% del territorio nacional. Dentro de los programas que desarrolla esta institución, se encuentra el apoyo económico y asistencia técnica para la

implementación de proyectos de energías alternativas en las ZNI. (IPSE, 2015): Los proyectos de energías alternativas que han tenido mayor impacto se han generado por alianzas entre el IPSE, IDEAM e instituciones de educación superior.

A nivel internacional en el año 2008 la Unión europea aprobó el denominado “Paquete verde” de medidas para reducir las emisiones de CO₂ e incentivar el uso de energías menos contaminantes e independientes de combustibles fósiles, las expectativas que se plantean resultan bastante ambiciosas, se proyecta reducir para el 2020 las emisiones atmosféricas en un 20% y aumentar el uso de energías alternativas en ese mismo porcentaje. A través de este tipo de acuerdos internacionales es posible la financiación de proyectos que aporten alternativas de solución a esta problemática.

Por otra parte, el artículo 2 numeral 4 del protocolo de Kioto plantea “investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales” (ONU, Protocolo de Kioto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, 1998), este es un llamado a las instituciones educativas y a la sociedad en general a trabajar en un cambio radical en la forma de obtención de la energía , de formas más sustentables y amigables con el planeta.

Una de las experiencias más exitosas en el país, se viene desarrollando desde el año 2011 en la zona del valle del Cauca que es líder en la generación energética a partir de bagazo de caña., la capacidad de cogeneración de energía eléctrica de los Ingenios azucareros llegó a 190MW, con unas ventas de 53MW a través de la red de interconexión eléctrica nacional. Para el 2015 se estima que la capacidad de

cogeneración será de 333MW de los cuales se considera que podrían venderse 145MW (Asocaña, 2012).

Existen también incentivos de tipo tributarios para este tipo de proyectos, la expedición de la Ley 788 de 2002 que consagró una exención a la renta generada por la venta de energía proveniente de biomasa, este ha sido un estímulo importante para el desarrollo de proyectos de generación a partir de esta fuente de energía. En el municipio de Necoclí Antioquia, se desarrolló un proyecto de aprovechamiento de madera de arrastre proveniente del río Mulatos, que beneficio a cerca de doscientas familias de escasos recursos.

2.2. Bases Teóricas:

2.2.1. Biomasa:

Las proyecciones del uso de la energía global se basan en escenarios cimentados en suposiciones acerca de crecimiento económico, superpoblación, avances tecnológicos, estrategias de conservación, adopción de tecnologías limpias, la disponibilidad y costos de los combustibles fósiles. Estas proyecciones suponen la necesidad de implementar estrategias de uso de energías renovables para satisfacer las necesidades de un mundo que crece exponencialmente, y en el cual sus recursos tienden a ser cada día menos limitados. (CORPOICA, 2010)

La biomasa, es una de las energías renovables con mayor proyección, ya que puede considerarse prácticamente inagotable; aquí se encuentra la materia vegetal generada a través de la fotosíntesis, y sus derivados, tales como residuos forestales y agrícolas, además de los animales y la materia orgánica contenida en los residuos industriales, domésticos y urbanos (Figura 1). Estos materiales contienen la energía química proveniente de la transformación energética de la radiación solar, la cual puede ser

liberada por medio de su combustión directa, o ser convertida, a través de procesos, en otras formas energéticas, para un fin determinado. (UPME, 2011).

El aprovechamiento de la biomasa para generación de Biogás o energía está determinado por el entorno donde se desarrolle el proyecto. Es necesario tomar en cuenta factores tales como: ubicación geográfica, clima, economía y social de la población para seleccionar la alternativa más favorable (UPME, Atlas de Biomasa Residual Colombia, 2011). Bajo estos criterios, la selección se basa en componentes como consecución de la materia prima, tecnología adecuada, espacio disponible, impactos ambientales, tasa de retorno y relación costo beneficio.

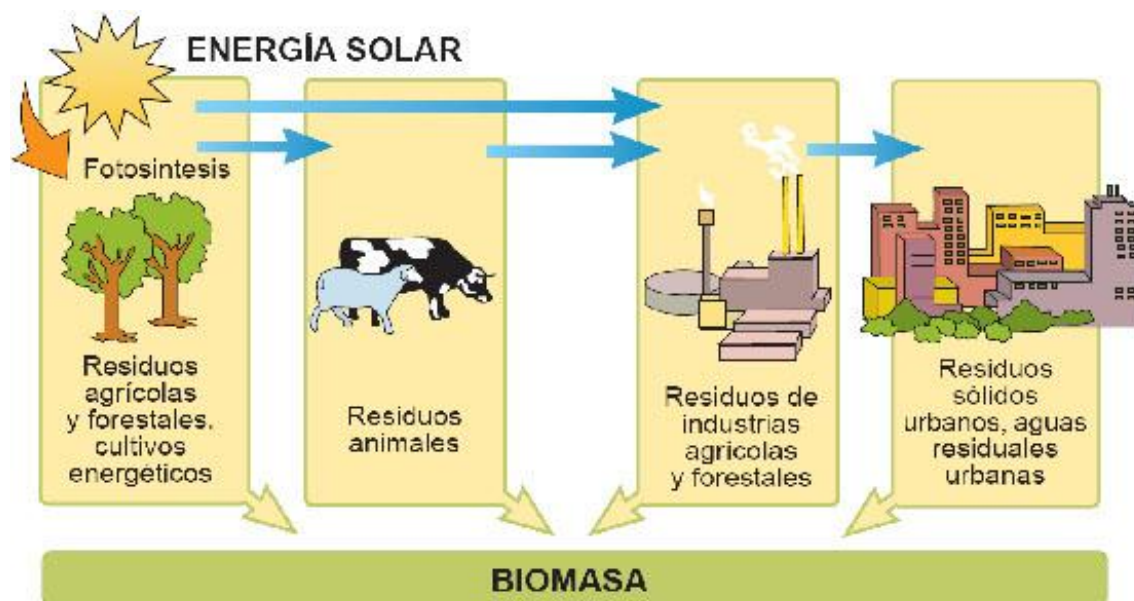


Figura 2. Tipos de Biomasa. <https://www.emaze.com>.

2.2.2. Contenido ruminal:

La generación de residuos orgánicos es una problemática mundial puesto que son agentes contaminantes de amplio espectro. La industria cárnica proporciona una alta carga de efluentes a los sistemas lóticos y lénticos del mundo, debido al mal manejo que se da a este tipo de residuos, en la mayoría de los casos es nulo. Además estos desechos pueden alcanzar capas del subsuelo donde pueden llegar a mantos acuíferos y contaminarlos. (Preace, 2011) El contenido ruminal es un producto obtenido del

proceso de sacrificio animal y representa el alimento ingerido por los animales poligástricos que es desechado al momento del sacrificio. “Es una mezcla de material no digerido que tiene la consistencia de una papilla, con un color amarillo verdoso y un olor característico muy intenso cuando está fresco, además posee gran cantidad de flora y fauna microbiana y productos de la fermentación ruminal” (Cruz., Digestion Ruminant, 2001), el tracto digestivo de los rumiantes está formado por varios compartimientos. (Figura 3).

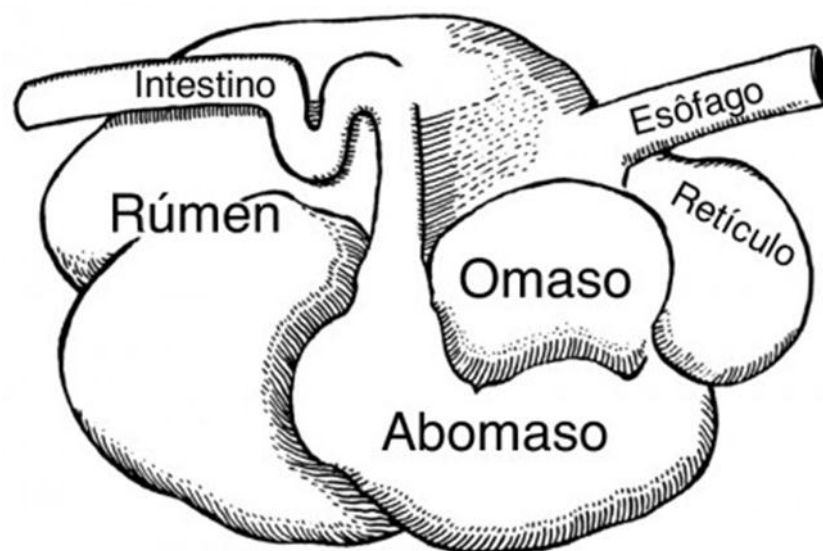


Figura 3. Estómago Bovino. Broca. 1997

El rumen es un órgano fundamental en el proceso digestivo de los rumiantes, es la cámara de fermentación que facilita un ambiente adecuado para el desarrollo de gran cantidad de especies microbianas, las cuales cumplen una función básica para el metabolismo degradando la biomasa y produciendo ácidos grasos volátiles (Uribe, 2003).

Cada mililitro de contenido ruminal alberga alrededor de 10 000 a 50 000 millones de bacterias, siendo estos los microorganismos más abundantes. Las bacterias se encuentran en una gran variedad de géneros y especies, las cuales se agrupan de acuerdo

a su actividad. La mayoría de las bacterias son anaerobias estrictas, que no pueden sobrevivir en presencia de oxígeno, sin embargo también se encuentran presentes organismos facultativos. (Cruz., Introducción a la Digestión Ruminal, 2001)

El contenido del rumen y retículo es de aproximadamente 4-6 Kg en los ovinos y de 30-60Kg en los bovinos (V, 1999). El alimento y los productos de la fermentación se acomodan en tres capas dependiendo de su gravedad específica:

- ❖ Capa gaseosa. Se localiza en la parte superior y en ella se encuentran los gases producidos durante la fermentación de los alimentos.
- ❖ Capa sólida. Está formada principalmente por alimento y microorganismos flotantes. El alimento consumido más recientemente, por ejemplo el día de hoy, se establece en la parte superior de esta capa, debido a que posee partículas de gran tamaño (1-2 cm), las cuales atrapan a los gases producidos. El alimento consumido con más anterioridad, por ejemplo ayer, se localiza al fondo de la capa sólida, debido a que ya fue fermentado suficiente y se redujo su tamaño (2-3 mm), en este momento puede ser captado por el retículo y salir a través del orificio retículo-omasal.
- ❖ Capa líquida. Se localiza ventralmente y contiene líquido con pequeñas partículas de alimento y microorganismos suspendidos.

2.2.3. Utilización de la Biomasa:

El aprovechamiento energético de biomasa puede desarrollarse mediante los siguientes procesos:

- ❖ Procesos Biológicos:

La biomasa puede ser degradada por medio de microorganismos que poseen la capacidad de transformar moléculas complejas en compuestos simples con alta densidad energética. Los procesos biológicos se utilizan generalmente en materiales orgánicos,

con un alto contenido de humedad, obteniendo combustibles líquidos y gaseosos como alcohol carburante, metano y gas carbónico. En términos económicos, la producción de biogás a partir de residuos líquidos no es rentable, pero en términos ambientales es muy positivo. Para el caso de los rellenos sanitarios presenta un balance económico positivo, sobre todo cuando los beneficiarios de los sistemas de calefacción y/o electricidad que se generan se encuentran en las proximidades. (Luis, 1994)

❖ Procesos Químicos:

Son los procesos más importantes para el aprovechamiento energético de la biomasa, producto de ellos se hace posible obtener biocombustibles que pueden ser utilizados en motores diesel (ésteres metílicos y etílicos) en mezclas con gasoil o puros. La degradación de la biomasa se genera por medio de reacciones hidrológicas en fracciones poliméricas de los azúcares y la lignina, los agentes químicos (base y ácido) actúan como catalizadores. (Vergara-López, 2007)

❖ Proceso termoquímico:

Realiza la transformación de biomasa en combustible, se efectúa sometiendo el material a temperaturas entre 200^a C y 1500^aC en atmósferas controladas (Elias, 2005). Técnicas como la combustión directa, pirolisis y gasificación trabajan mediante este principio. La figura 3 resume la clasificación de los procesos de transformación de biomasa mencionados y sus respectivos productos. (E, 2011)

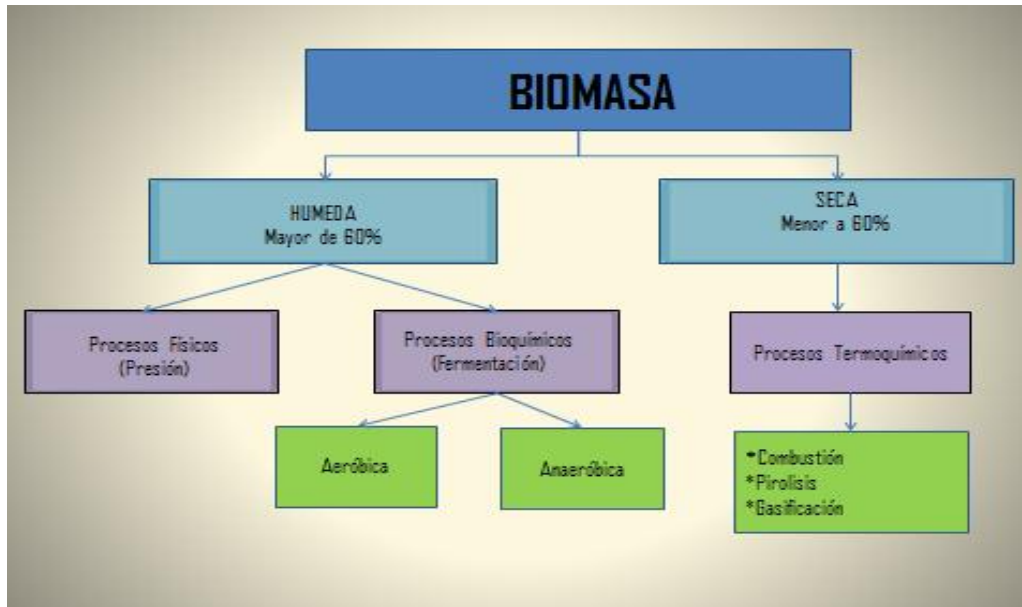


Figura 4. Procesos de conversión energética de Biomasa. Autor

2.2.4. Digestión Anaerobia:

Según Tchobanoglous 1998, la producción de metano a partir residuos sólidos se realiza en tres pasos:

1. Hidrólisis: Transformación por enzimas de compuestos de masas moleculares altos a compuestos aptos para ser usados como fuente de energía y tejido celular.
2. Acido génesis: Conversión bacteriana de los compuestos resultantes de la primera etapa a compuestos intermedios identificables de masa molecular más baja.
3. Metalogénesis: Conversión bacteriana de los compuestos intermedios a productos finales sencillos, principalmente metano y dióxido de carbono. Las rutas utilizadas se pueden ver en la figura 5.

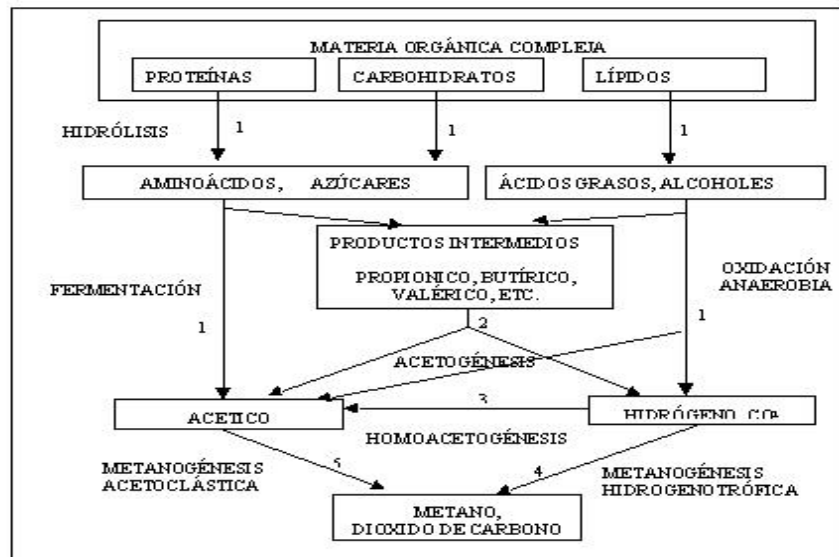
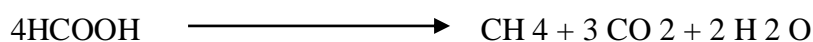
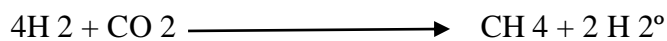


Figura 5. Rutas digestión anaerobia. Tchobanoglous.1998

Las bacterias de metano solo pueden usar un número de sustrato limitado para formar metano, el sistema de digestión debe tener un equilibrio dinámico entre bacterias metanogénicas y no metanogénicas, para lograr esto, el contenido del reactor debe estar libre de oxígeno disuelto y de concentraciones inhibitoras de amoníaco libre, pH debe estar en un rango entre 6,5 y 7,5, sin caer por debajo de 6,2 ya que las bacterias metanogénicas no pueden actuar por debajo de ese rango. (Maria Westerholm, 2010)

Los metanògenos utilizan como sustrato $\text{CO}_2 + \text{H}_2$, formiato, acetato, metanol, metalinaminas y monóxido de carbono (Tchobanoglous, 1998). Las reacciones típicas de conversión son:



2.2.5.. Biogas:

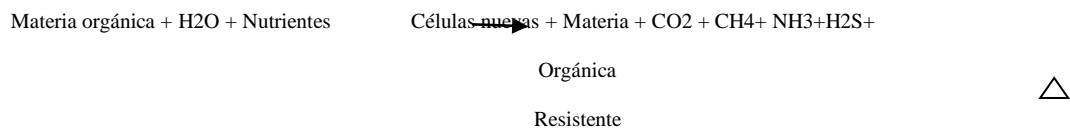
Es un producto de la digestión anaeróbica de la materia orgánica, posee un alto valor energético y puede transformarse en electricidad y/o calor con ayuda de unidades de cogeneración. Como subproducto se obtiene además, un lodo residual estabilizado: biofertilizantes o biol, es más rico que el humus y de granulación más fina que el estiércol, lo cual facilita su penetración y mezcla en el suelo (Gon, 2008)

El contenido ruminal puede aprovecharse como compost de forma aeróbica y como productor de biogás anaeróbicamente, proporcionando al ambiente un nivel diferente de salubridad y brindando un beneficio al ser humano, puesto que con el compost se puede producir abono orgánico, librando al agricultor de algunos agro insumos y con la producción anaeróbica se puede realizar una producción de biogás que se emplea como fuente energética, un efecto adverso importante de la ganadería es la emisión de CO_2 , cuando se produce de forma incontrolada, pero la generación controlada y aprovechable en los biodigestores genera importantes beneficios ambientales. (Buenrostro, 2000)

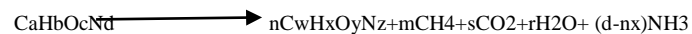
El biogás es un gas combustible un poco más liviano que el aire (Densidad de 0,94 Kg/m³ a condiciones atmosféricas), posee una temperatura de inflamación de alrededor de 700°C y la temperatura de la llama alcanza 870°C. El biogás está compuesto por varios gases como: metano (CH_4) (50% a 70%), bióxido de carbono (CO_2) (30% a 50%), ácido sulfhídrico (H_2S) (0,1% a 1%) y nitrógeno (N) (0,5% a 3%). Su pureza y calidad dependen de la cantidad de metano que contengan; cuanto mayor es el porcentaje de este gas, posee mayor poder calorífico (Martrinez, 2011).

El biogás se genera artificialmente, en biodigestores, donde la materia orgánica, contenida en residuos se degrada por la acción de bacterias metanogénicas, mediante procesos bioquímicos.

La transformación anaerobia general de materia orgánica se describe mediante la siguiente ecuación:



La conversión global de la fracción orgánica de un residuo en metano, dióxido de carbono y amoníaco se representa como: (Lucia., 2011)



2.2.6. Biodigestores:

Un Biodigestor es un contenedor hermético, donde se llevan a cabo, reacciones bioquímicas que se encuentran en condiciones de ausencia de oxígeno, en presencia de catalizadores microbiológicos que son sensibles al pH. La digestión anaerobia de sólidos de baja concentración (4-8%), es aplicada en varios artes del mundo para generar metano a partir de residuos humanos, agrícolas y animales. (Ramalho, 1996) .

Algunos biorreactores que se pueden utilizar para este proceso son:

Biodigestor Discontinuo: Este tipo de Biodigestor se caracteriza porque se carga una vez y la materia orgánica se descarga cuando el proceso de fermentación ya haya terminado, Este tipo de Biodigestor se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente. Su estructura se caracteriza porque tener forma de cilindro el cual tiene una entrada para ingresar el residuo orgánico, una salida para que una vez se termine el proceso de fermentación se descargue , también posee una salida para la evacuación del biogás. (Polo, 2013)



Figura 6. Biodigestor discontinuo. (Hera, Plantas de Biogas, 2013)

Biodigestor Semicontinuo: Este tipo de Biodigestor se caracteriza porque se carga diariamente, su estructura se construye en ladrillos o concreto, tiene una entrada principal para el llenado, otra entrada para el material, una salida para el material degradado y una de salida del gas. (SAGARPA, 2013)

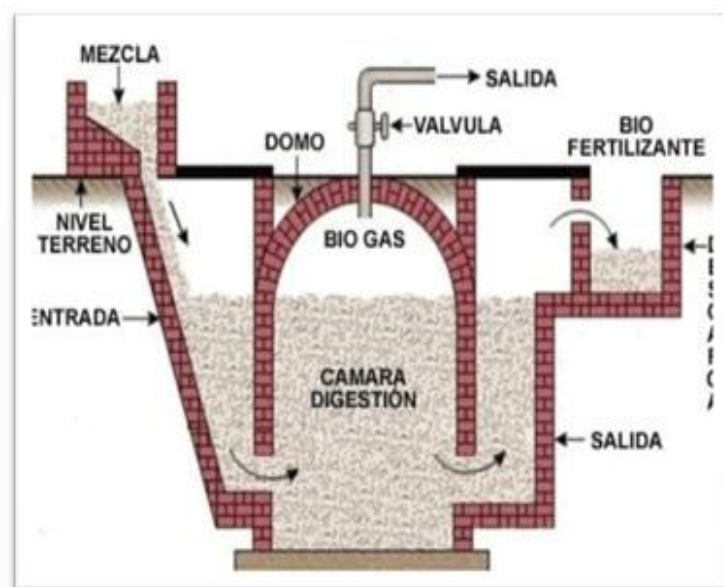


Figura 7. Biodigestor Semicontinuo. <http://bio-digestores.blogspot.com>

Digestor de flujo continuo: Este tipo de Biodigestor se caracteriza porque se carga continuamente y el contenido se mezcla completamente, este tipo de Biodigestor es el más utilizado para digestión anaerobia. (Energía), “Biomasa: Digestores anaerobios”, 2007)

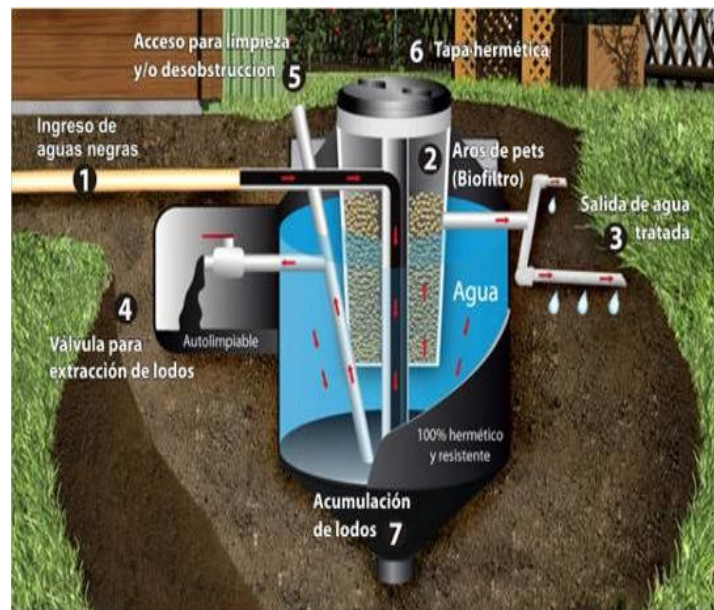


Figura 8. Biodigestor continuo. <http://www.leer-mas.com>

Biodigestor tipo Batch: Este tipo de digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir gas combustible. Normalmente consiste en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro, donde se almacena el biogás. Este sistema es aplicable cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En este tipo de sistemas se usa una batería de digestores que se cargan a diferentes tiempos para que la producción de biogás sea constante. Este tipo de digestor es también ideal a nivel de laboratorio si se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un residuo orgánico o una mezcla de ellas. De los sistemas Batch, el más usado es el OLADEGUATEMALA, por la facilidad de construcción del sistema, la sencillez en el proceso de digestión, la alimentación del digestor puede ser con residuos vegetales o también mezclando

residuos vegetales con pecuarios y por su mayor producción de biogás, en comparación con el modelo chino e hindú. La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0 m³ biogás/m³ digestor. (Solari, 2004)

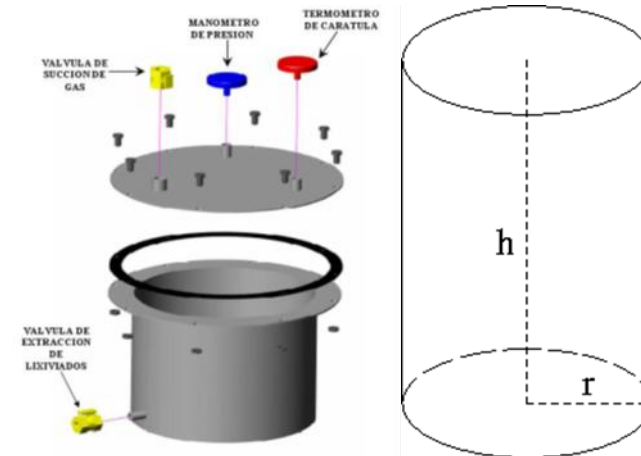


Figura 9. Biodigestor Batch. López. 2011.

2.3. Marco de antecedentes

En 2008 la Unión europea aprobó el denominado “Paquete verde”, medidas para reducir las emisiones de CO₂ e incentivar el uso de energías menos contaminantes e independientes de combustibles fósiles, las expectativas que se plantean resultan bastante ambiciosas, se proyecta reducir para el 2020 las emisiones atmosféricas en un 20% y aumentar el uso de energías alternativas en ese mismo porcentaje. El protocolo de Kioto plantea “Investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales; limitación y/o reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos así como en la producción, el transporte y la distribución de energía”.(ONU, 1997).

En Colombia se han realizado investigaciones sobre el aprovechamiento de contenido ruminal como complemento alimenticio para otras especies animales como cerdos y

conejos, pero a nivel de generación de biogás no se encuentra documentado proyecto alguno.

A mediados del siglo XX, el doctor Manuel Alfredo Llorens utilizó contenido ruminal como alimento animal, mediante el secado de la ruminaza obtenido en centros de sacrificio de animales que pastaron antes de ser sacrificados y con la adición de harinas se fabricaron bolos sólidos de 50 gr, para alimentar terneros destetados.

Facundo Velasco et al.2006, investigador del SENA seccional Santander realizo un proyecto sobre sobre Uso de contenido ruminal bovino como alimento de cerdos ya que detectó una problemática en el municipio de Floridablanca, allí su actividad económica básica es la cría y levante de cerdos determinando que la producción se veía afectada por el alto costo de los concentrado y la baja producción; su investigación lo llevo a la conclusión que había que encontrar fuentes alternativas de alimentación para los porcinos, más económicas que los concentrados y que presentaran menos riesgo que la dieta basada en lavaza, para esto se determinó utilizar el contenido ruminal que se generaba en el matadero municipal y que generaba una grave degradación ambiental a la zona, ya que a este residuo no se le daba ningún uso y simplemente era amontonado en un área cercana. Se preparó una dieta que utilizaba 40% de contenido ruminal, 40% de mogolla de trigo, 13% de harina de viseras de pollo, 6% de melaza y 1% de sal. El resultado que se obtuvo fue un aumento de peso superior al 14% respecto a animales alimentados con la dieta tradicional.

Buenrostro et al. ,(2000) habla en la revista Internacional de Contaminación Ambiental, sobre una investigación para determinar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia para tratar los residuos orgánicos generados en mercados municipales; efectuaron pruebas físico químicas cuyos resultados indican que este tipo de fermentación resulta

eficiente para tratar esta clase de residuos, por su alta humedad, pH ácido y consistencia fibrosa. Realizaron el proceso a nivel de laboratorio en un reactor anaerobio, elaborado en lámina galvanizada y cubierto con un antioxidante en el interior, las muestras de residuos orgánicos se consiguieron en seis mercados de la ciudad de Morelia. El reactor se cargó inicialmente con 40 Kg de materia orgánica (frutas, legumbres, vegetales, plumas, madera, vísceras, hueso, excretas, cuero, etc.) Durante el proceso se controló la temperatura a 35° C dentro del Biodigestor en condiciones anaerobias: Esta investigación determinó un lapso de 7 días como tiempo adecuado para la digestión de la materia orgánica.

Bermúdez et al. (2010) en su tesis para obtener el título en ingeniería Electrónica realizaron un proyecto donde implementaron un Biodigestor utilizado en la producción de biogás basado en el estudio de temperatura, presión y el pH del sustrato. La investigación analizó el proceso de producción de gas generado por estiércol de cerdo en diversas temperaturas en el rango mesofílico.

2.4. Marco Geográfico

Existen amplias zonas de Colombia que presentan problemas de desabastecimiento energético, por ejemplo zonas donde no hay energía eléctrica o que la energía eléctrica en ciertas épocas en el año incrementa su valor debido al bajo caudal de los ríos. En Nocaima Cundinamarca existe esta última problemática, donde en épocas como diciembre y enero el costo de la energía eléctrica se incrementa, generando una problemática de tipo económico ya que en este municipio la personas viven en fincas y el nivel de vida no es alto, sin embargo estas fincas generalmente se puede encontrar diferentes clases de animales que producen desechos a los que se podría dar un aprovechamiento y utilizarse para suplir el consumo de energía eléctrica.

Mediante el aprovechamiento de subproductos de la industria ganadera se disminuyen los impactos negativos de la industria mejorando el desempeño ambiental y aportando alternativas de solución en dos campos fundamentales los residuos sólidos y la generación energética con fuentes alternativas.

2.5. Marco Institucional

La problemática de los desechos de centros de sacrificio ha estado a cargo del Ministerio de Salud y el Ministerio de Agricultura a través de las Secretarías Departamentales y Municipales de Salud y las Corporaciones Autónomas Regionales. Estos Organismos ejercen control sanitario sobre las actividades propias de faenado, así como, en el impacto ambiental de sus desechos. En Colombia, no existe una entidad oficial que se ocupe del tratamiento técnico de la utilización de los desechos de centros de sacrificio animal. (CORPOICA, 2010)

La industria ganadera genera problemáticas relacionadas con disposición de residuos sólidos, vertimientos y falta de responsabilidad social empresarial. Es innegable que con respecto a los aportes medioambientales de la actividad al desarrollo sostenible, aún hay mucho por hacer; como lo demuestran las siguientes cifras registradas en el informe del estado de los recursos naturales y del ambiente. (Nación, 2012)

- ❖ 99% de los mataderos en el país no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales adecuado.
- ❖ 93% vierte sus aguas residuales directamente a un cuerpo de agua, al alcantarillado o a campo abierto.
- ❖ 84% vierte el contenido ruminal directamente a los cuerpos de agua o en campo abierto.
- ❖ 33% no hace en lo absoluto ningún uso de la sangre resultante de los procesos de sacrificio y faenado.

- ❖ 57% no cuenta con rubro presupuestal propio.
- ❖ 93% de los mataderos de Colombia son de carácter público.

Para garantizar las políticas de sostenibilidad alimentaria y ambiental, es evidente la necesidad que tiene Colombia de reducir las tierras dedicadas a la ganadería, la encuesta nacional agropecuaria DANE, señala que para el 2013, “El área dedicada a la producción de diferentes tipos de ganado pasó de 30 millones de hectáreas a 30,36 millones de hectáreas, lo que equivale a un crecimiento de 1,2 por ciento” (DANE, 2015). El departamento de Antioquia tiene el 11% del total de ganado vacuno a nivel nacional. De acuerdo a estas cifras se está generando una sobreexplotación del suelo, ya que en el país, solo 19 millones de hectáreas son aptas para uso ganadero (IDEA, 2010). La producción de carne y leche de origen bovino también ha aumentado en un 25% de acuerdo a datos de Fedegan “La producción de carne bovina en 2013 fue de 957 mil toneladas. (FEDEGAN, 2015) Figura 10.

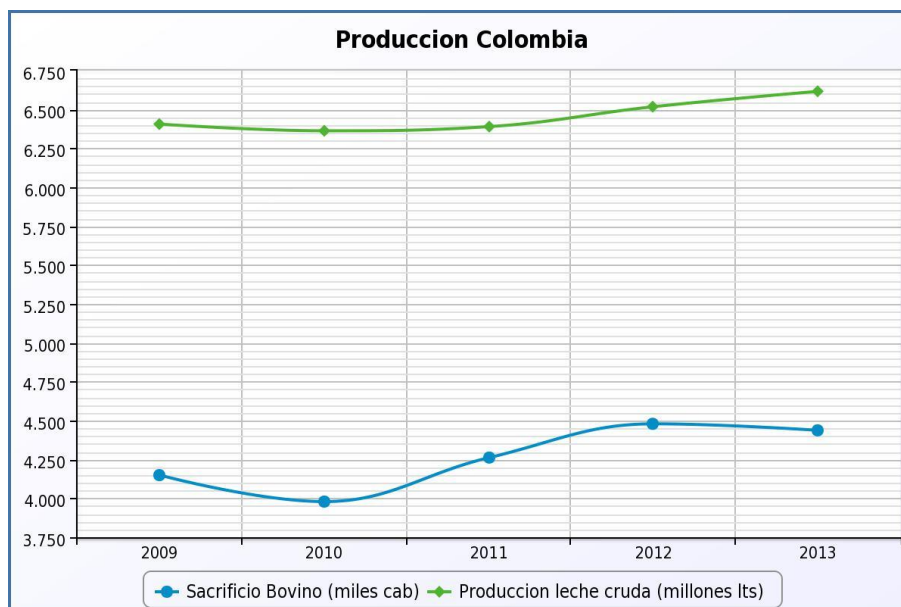


Figura 10. Producción Bovinos. Fedegan. 2014

Las zonas donde se efectuó el mayor número de sacrificios fueron Antioquia, Bogotá, Valle del Cauca Figura 11.

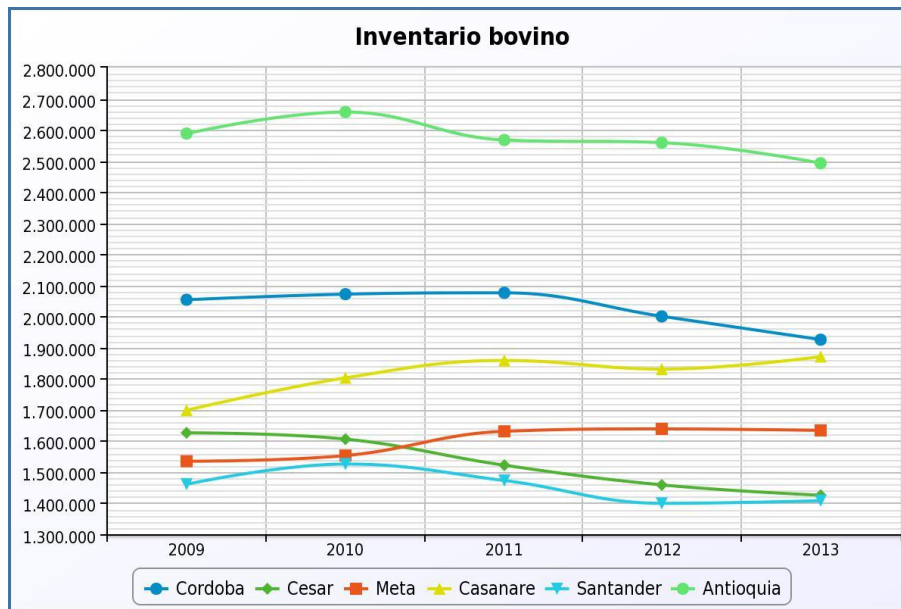


Figura 11.Sacrificio Bovinos. Fedegan.2014

Los subproductos del proceso productivo como: sangre, pieles, huesos, heces, contenido ruminal; generan impactos negativos al ambiente debido a su deficiente manejo y disposición final. El contenido ruminal como biomasa animal húmeda, tiene potencial para ser utilizado inoculo en procesos de biodigestion o como materia prima para la producción de gas metano, permitiendo no solo mejorar el desempeño ambiental del sector pecuario sino también abrir puertas para la producción de energía eléctrica, mecánica o para el uso doméstico de los hogares.

El decreto 1500 de 2007 establece “Para el manejo de los residuos generados en los procesos internos, todos los establecimientos de que trata el presente capítulo, deberán contar con instalaciones, elementos, áreas y procedimientos tanto escritos como implementados que garanticen una eficiente labor de separación, recolección, conducción, transporte interno, almacenamiento, evacuación, transporte externo y disposición final de los mismos y deberán contar con registros para su verificación. Este programa, se desarrollará cumpliendo con los lineamientos establecidos en el presente decreto y la legislación ambiental vigente” (Bogotá, 2007) Sin embargo las condiciones

de salubridad de los centros de sacrificio no son adecuadas, poniendo en riesgo la salud de los operarios y consumidores.

2.6. Marco Legal

En las últimas cuatro décadas el mundo empieza a tomar conciencia respecto al deterioro ambiental y la necesidad de asumir medidas que contribuyan a la conservación y protección ambiental. En 1991 Colombia promulgo su actual constitución política donde se abren espacios en cuanto a regulación y políticas ambientales, reconociendo como un derecho colectivo el goce de un ambiente sano y dando a los ciudadanos mecanismo de participación comunitaria para la defensa de sus derechos.

Para el tema de residuos sólidos, aprovechamiento e implementación de energías alternativas en Colombia, se encuentran las siguientes disposiciones:

- ❖ Ley 697 de 2001. Fomenta el uso racional y eficiente de la energía, promueve el uso de energías alternativas en Colombia.
- ❖ Decreto 3683 de 2003. Reglamenta URE. Estímulos y reconocimientos
- ❖ Decreto 1500 de 2007. Sistema Oficial de Inspección, Vigilancia y Control de la Carne
- ❖ Decreto 2270 de 2012. Por el cual se crea el Sistema Oficial de Inspección, Vigilancia y Control de la Carne, Productos Cárnicos Comestibles y Derivados Cárnicos, destinados para el Consumo Humano y se fijaron los requisitos sanitarios y de inocuidad que se deben cumplir en su producción primaria, beneficio, desposte, desprese, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación.
- ❖ Ley 1665 de 2013: Estatuto de la agencia internacional de energías renovables (IRENA)", plan energético nacional PEN 2010-2030.

- ❖ Decreto 1287 de 2014: Por el cual se establecen criterios para el uso de los Biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
- ❖ Decreto 351 de 2014: Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en la atención en salud y otras actividades.
- ❖ Ley 1715 de 2014: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

3. METODOLOGÍA:

3.1.Población/Muestra

La investigación se enmarca dentro de un estudio descriptivo, se pretende evaluar el potencial energético de Biomasa “contenido ruminal” interpretando y analizando los datos recopilados durante el desarrollo del proyecto con un enfoque cualitativo y cuantitativo. Se desarrolló un proceso a nivel de laboratorio para realizar la caracterización del contenido ruminal obtenido en el centro de sacrificio animal de Nocaima Cundinamarca y generar experimentalmente biogás, con este proyecto se pretende diezmar la degradación ambiental que genera este producto en su proceso de descomposición natural. La recolección de las muestras se realizó en el Municipio de Nocaima Cundinamarca, con acompañamiento del Médico Veterinaria Carolina Cifuentes, funcionaria de la Umata del municipio, las pruebas físicas químicas de laboratorio y el montaje y control de los Biodigestores se realizó en el laboratorio de Química de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.Figura12

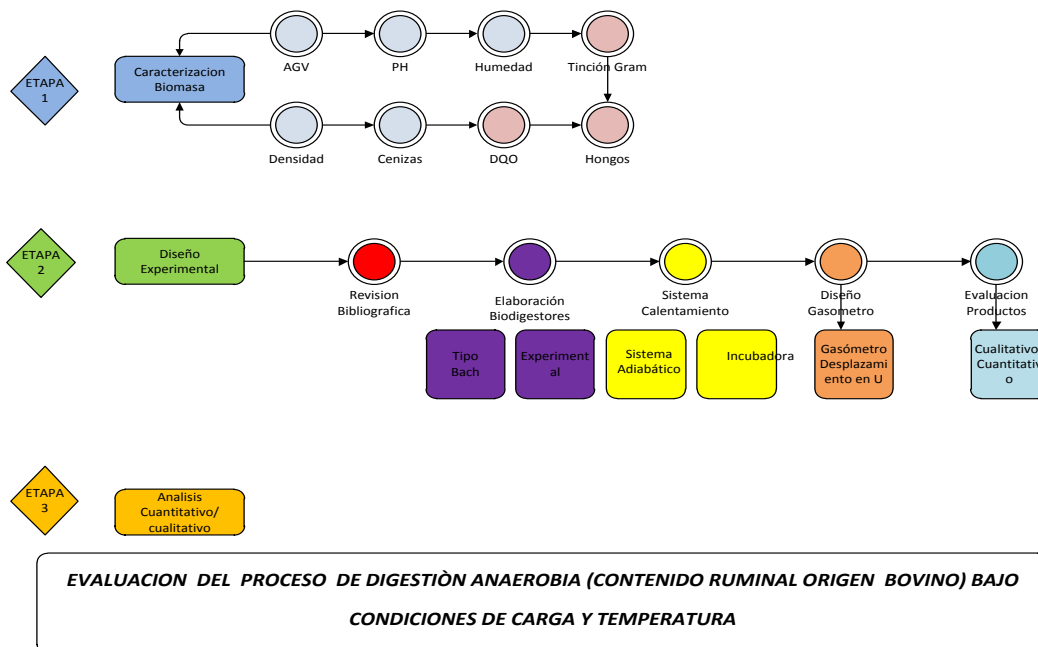


Figura 12. Diseño Metodológico

3.2. Tipo/Diseño de investigación

Primera Parte:

Recolección de información y fuentes: Durante esta etapa se revisó e interpretó los avances realizados por grupos de investigación, estudiantes e investigadores a nivel nacional e internacional sobre procesos de biodigestión, generación energética a partir de biomasa y producción de biogás.

Segunda Parte

Caracterización del Material: Mediante pruebas físicas, químicas y microbiológicas se caracterizaron por triplicado las muestras de contenido ruminal bovino extraídas del centro de beneficio animal de Nocaima Cundinamarca.

Tercera Parte

Se determinó los tipos de biodigestores, los métodos de calentamiento y las variables a tener en cuenta para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Cuarta Parte

Pruebas de Laboratorio: Cuantitativas Carga / Temperatura; toma de datos (volumen de gas y prueba de llama)

- ❖ El Biodigestor se cargó a un 80% de su capacidad total alrededor de 800 ml, con dos tipos de mezclas (contenido ruminal/ agua destilada)
- ❖ Se realizaron tres pruebas con cuatro biodigestores de vidrio de un litro con carga 50/50 y 70/30 por un periodo de cinco semanas a una temperatura entre 30°C y 33°C
- ❖ Se realizaron tres pruebas con cuatro biodigestores de vidrio de un litro con carga 50/50 y 70/30 por un periodo de cinco semanas a una temperatura entre 34°C y 37°C
- ❖ Se cerraron los biodigestores, se extrajo mediante bomba de vacío el aire contenido en su interior y se verificó mediante prueba hidráulica que no presenten fugas. Se llevaron al horno de calentamiento para iniciar el proceso de digestión anaeróbica, por un periodo de tiempo de 30 días

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para las pruebas, la frecuencia en la toma de datos y los resultados obtenidos y el análisis de los mismos. Se describen en la tabla 1. (Anexo 1)

Quinta Parte

Pruebas : Cualitativas; con base en la información recolectada en la fase anterior en cuanto a la mayor eficiencia del sistema se extraen muestras del biogás producido y se realizaron análisis de laboratorio (Cromatografía de gases) para determinar la composición en porcentajes de metano y dióxido de carbono.



Figura 13. Bolsas Tedlar. Autor

Para realizar una separación analítica mediante cromatografía de gases se siguieron los siguientes pasos:

- ❖ Se recolectó muestras de tres pruebas diferentes (dos utilizando trampa , una sin trampa) al término de la segunda semana de proceso en bolsas Tedlar
- ❖ Se transportaron a la Universidad Nacional para su análisis
- ❖ Se inyectó una pequeña cantidad de la muestra a separar en una corriente de gas inerte(He) a elevada temperatura (fase móvil)
- ❖ La corriente de gas atraviesa la columna cromatográfica que separa los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de partición (cromatografía gas/ liquido)
- ❖ Los componentes separados emergen de la columna a intervalos pequeños y pasan al sistema de detección e identificación
- ❖ Por último se enviaron al dispositivo de recogida de muestras.

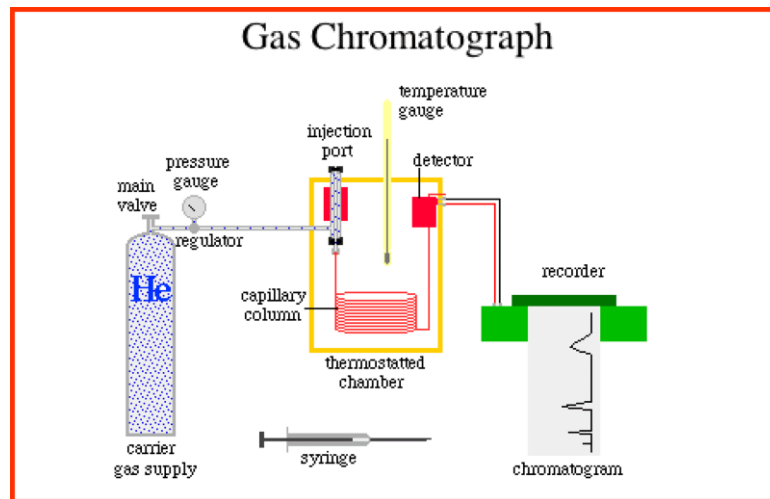


Figura 14. Partes Cromatografo de gases. <http://www.uib.cat/depart>

3.3. Materiales/ Equipos: Anexo 2

3.4. Técnicas de Análisis:



Figura 15. Municipio de Nocaima y plaza de mercado. Autor

3.4.1. Caracterización:

Las características biofísico químicas la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar. Resulta fundamental el determinar las características fisicoquímicas de la muestra para evaluar sus posibles usos y lograr evaluar su potencial energético para obtener la mayor eficiencia dentro del proceso.

Las variables físicas son evaluadas por duplicado y los resultados se presentan en porcentaje peso a peso con muestra seca, estas variables son:

3.4.1.1. Densidad: Se utilizó método volumétrico con la muestra de materia orgánica seca. Figura 16



Figura 16. Proceso determinación densidad. Autor

3.4.1.2. Humedad: Este parámetro se mide con método analítico por medio de balanza determinadora de humedad Precisa. Figura 17

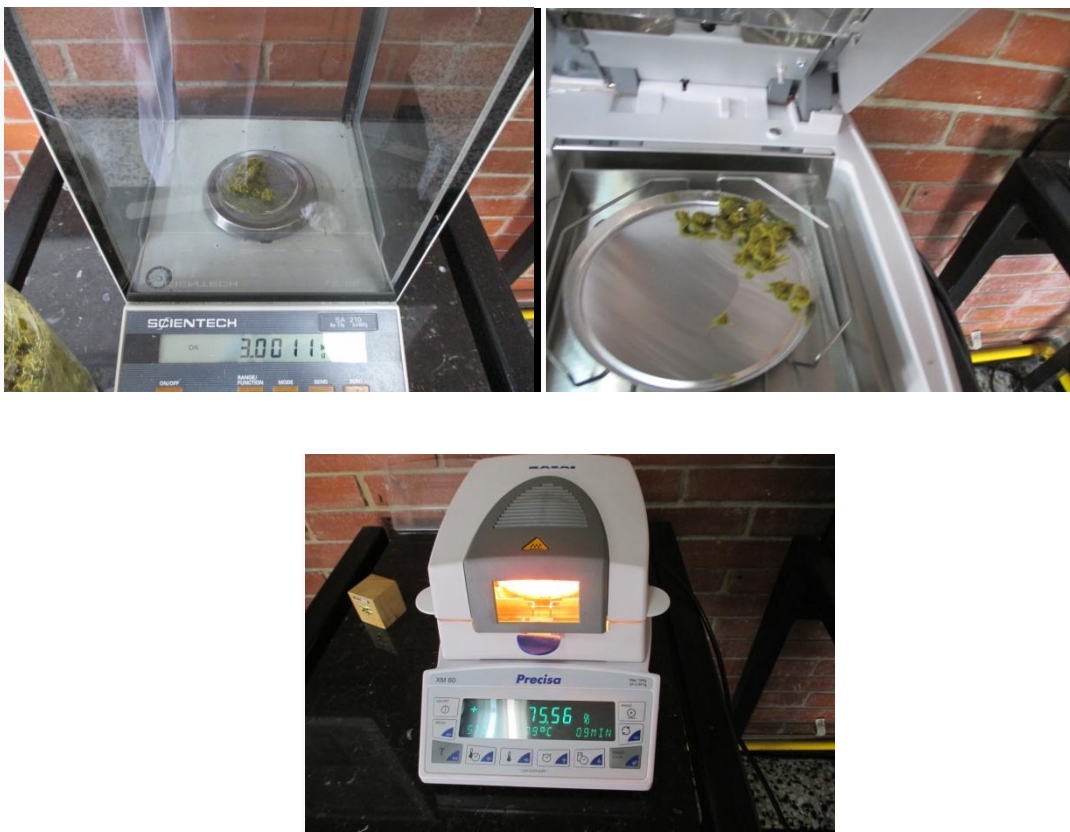


Figura 17. Determinación porcentaje de humedad. Autor.

3.4.1.3. Cenizas: Se determina mediante método gravimétrico con materia orgánica

seca. (Figura 18)



Figura 18. Determinación ceniza. Autor.

3.4.1.4. Material Volátil: Se utilizó método gravimétrico



Figura 19. Determinación material volátil. Autor.

Las variables químicas evaluadas por duplicado y los resultados se presentan en porcentaje peso a peso con muestra seca, estas variables son:

3.4.1.5. PH: Se utilizó PH metro y materia fresca diluida 50/50 Figura 20



Figura 20. Determinación pH. Autor.

3.4.1.6. DQO: Método analítico, se utilizó termo reactor



Figura 21. Determinación DQO. Autor

3.4.1.7. Tinción Gram: Método de identificación bacteriana

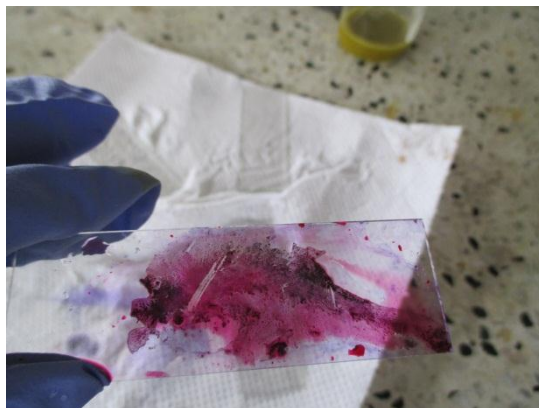


Figura 22. Tinción Gram. Autor

3.4.2. Biodigestor:

Se determinó que los biodigestores deben tener dimensiones tales que puedan ser transportados fácilmente de un lugar a otro, según necesidades, y adicionalmente que debían tener una capacidad suficiente para procesar una cantidad total de 1 litro (1000 ml), y hasta un máximo de 800 ml de materia orgánica mezclada con agua; adicionalmente se estimó que la cantidad de agua a agregar, podía variar desde un

mínimo de 30% hasta un máximo del 50%, con relación al peso de la biomasa a procesar, con el fin de dar un amplio espectro de concentración de sólidos volátiles

Otro parámetro que debe ser tomado en cuenta es la temperatura a la que se desarrollarían los procesos de Biodigestion, se puede trabajar con la temperatura ambiente, o variar este parámetro, hasta un máximo de 55°C, pudiendo así cubrir los rangos existentes, como son, psicrófilicos (de 0°C a 15°C), el mesófilico (de 16°C a 35°C) y termófilicos con temperaturas superiores a los 35°C. El último factor a tener en cuenta fueron los porcentajes de la carga de los biodigestores es decir la relación materia orgánica/ agua.



Figura 23. Calentamiento Biodigestores Laboratorio. Autor



Figura 24. Biodigestores Laboratorio. Autor

3.5. Procedimiento

3.5.1 Temperatura y Presión: Se tomó en cuenta las condiciones climáticas de Bogotá, (altitud 2640 metros, velocidades promedio de viento 1,2 m/seg. humedad relativa de 40%, precipitación acumulada promedio de 700 mm año, una presión atmosférica media de 0,756 bar, y una temperatura media de 14 °C).

3.5.2. Calentamiento: Se debe tener en cuenta la facilidad de transferir el calor desde y hacia los biodigestores para poder garantizar temperaturas homogéneas en la materia orgánica. Debido a que los biodigestores trabajarán principalmente con las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá, por lo tanto se debe disponer de un sistema que

permita controlar la temperatura de operación en los biodigestores. Se utiliza un horno Memmet con rango de temperatura entre 10°C y 200° c



Figura 25. Horno Memmet. Autor

3.5.3. Gasómetro y Sistema de purificación del biogás: Debido a la presencia de estos compuestos se hace necesario secar, desulfurar y retirar el CO₂, para eliminar contaminantes del biogás para realizar su cualificación y cuantificación. Los componentes del Biogás en función del sustrato se encuentran en la tabla 2 (Anexos)

Para medir el volumen de biogás producido se empleó un método volumétrico utilizando el principio de desplazamiento de un líquido, la extracción de biogás se realizó a diario después de los primeros siete días del proceso.

El biogás generado en el Biodigestor, se extrae retirando del montaje el aire utilizando bomba de vacío, luego se abre la válvula de la tapa, el biogás ingresa al montaje a través de una manguera de silicona transparente, de esta forma el volumen generado ejerce presión en el sistema y desplaza la solución de NaOH contenida en la probeta, produciéndose una diferencia de altura H, esta diferencia de altura representa el volumen de gas que ingresa y este volumen de biogás desaloja un volumen de solución.



Figura 26. Gasómetro utilizado. Autor

Para calcular el volumen de biogás, se utiliza la metodología propuesta por Mena 2007, se determina el diámetro interno de la probeta que es de 4,5 cm y se multiplica por la altura desplazada por el biogás, expresada en la siguiente ecuación:

$$V = \pi \cdot \frac{(4,5 \text{ cm})^2}{4} \cdot \frac{H}{2} = 7,95 \cdot H$$

El volumen de solución desalojada, representa el doble del volumen de gas generado a presión atmosférica, al considerar su mitad, se obtiene el volumen que se quiere determinar. (Mena M, 2007).

Los autores consultados indican que la composición del biogás esta determinada en los siguientes porcentajes: Metano CH₄ (50% - 70%), dióxido de carbono CO₂ (30%- 50%), sulfuro de hidrogeno H₂S (0,1%- 1%) y nitrógeno N (0,5%- 3%).

Su pureza y calidad dependen de la cantidad de metano que contenga, ya

que cuanto mayor es el porcentaje de este gas, más puro y con mayor poder calorífico

Se realizó un montaje que permitió realizar en el mismo proceso la purificación y medir la cantidad de CH₄ generado. El montaje estaba conformado por una bomba de vacío, una pancha de calentamiento, Biodigestor, Erlenmeyer de 500 ml, probeta de 250 ml, bandeja de plástico 1000 ml, dos soportes universales, 3 mts de manguera, 800 ml de

solución de NaOH al 10% y 100gr de limadura de hierro. El sistema mide el desplazamiento de la solución de NaOH contenida en la probeta de 250 ml, mediante la presión negativa que ejerce el gas al abrir la válvula de Biodigestor.

Sulfuro de hidrógeno: (H_2S) Es un contaminante por su olor desagradable y alto poder corrosivo. Para eliminar el sulfuro de hidrógeno se hace pasar la corriente de biogás por un Erlenmeyer que contiene 100 gr limadura de hierro y 100 gr de carbón activado. (Gon, 2008) . La absorción a través de limallas de hierro, es llevada a cabo en columnas de purificación, esta tecnología demanda habitualmente humedecer con agua las limallas, ya que se debe un nivel de entre 30 y 60 % de humedad en el sistema. (Lucia., 2011)



Figura 27. Purificador de H_2S (limadura de hierro 100 gr). Autor

Dióxido de carbono: (CO_2) Se puede eliminar utilizando una solución de NaOH (5 gr de NaOH en 1000 L de agua para eliminar 3200 L de dióxido de carbono). (Martinez, 2011)



Figura 28. Purificador de CO₂ (Solución de hidróxido de sodio 10%). Autor

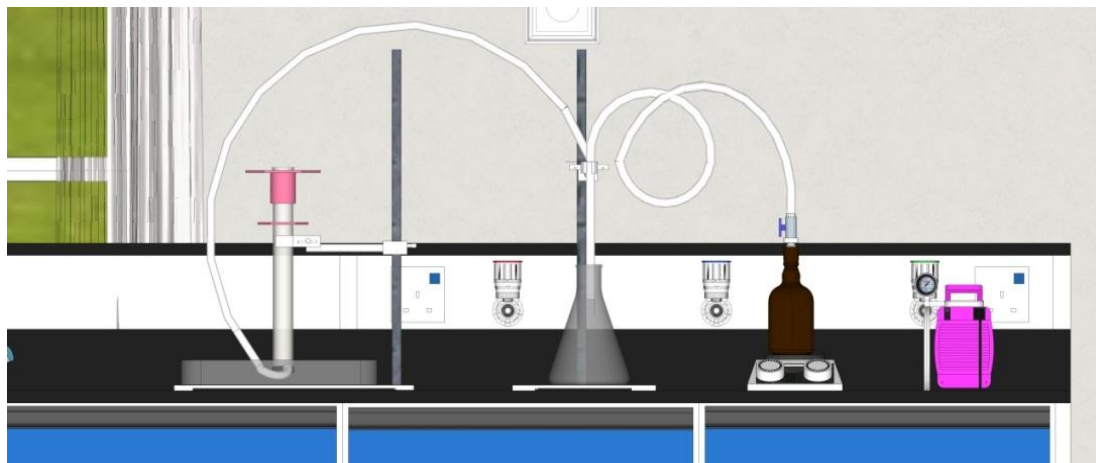


Figura 29. Sistema para medir volumen de gas por desplazamiento. Autor

3.5.4. Recolección del Biogás y Prueba de Llama: El biogás es recolectado haciéndolo pasar por dos Erlenmeyer el primero con limadura de hierro y el segundo con una solución de hidróxido de sodio al 5 % para terminar en un balón con llave de teflón.

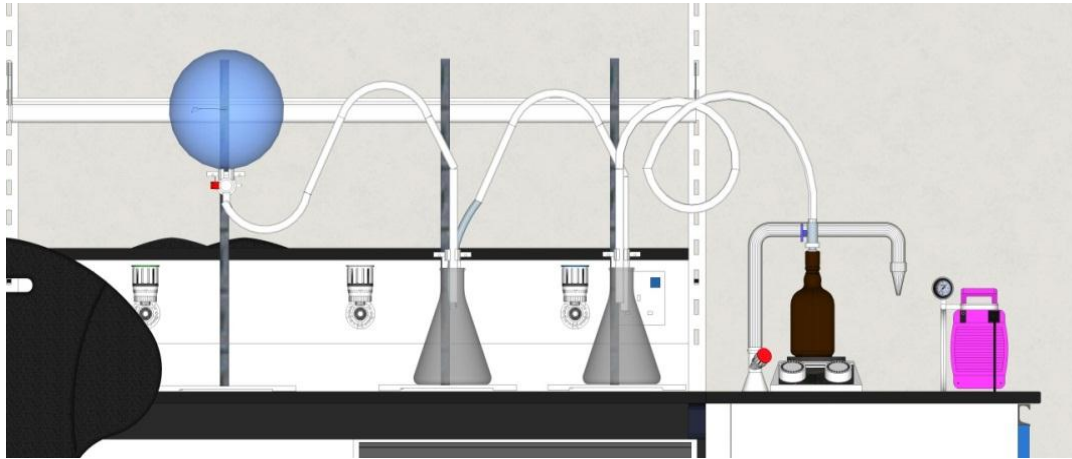


Figura 30. Sistema de Purificación del proceso. Autor

Se realiza prueba de llama sobre los cuatro biodigestores cada siete días para determinar cualitativamente la calidad y cantidad de llama generada. Esta prueba cualitativa permite comprobar la presencia de metano en la muestra y el color de la llama permite predecir la calidad del biogás.

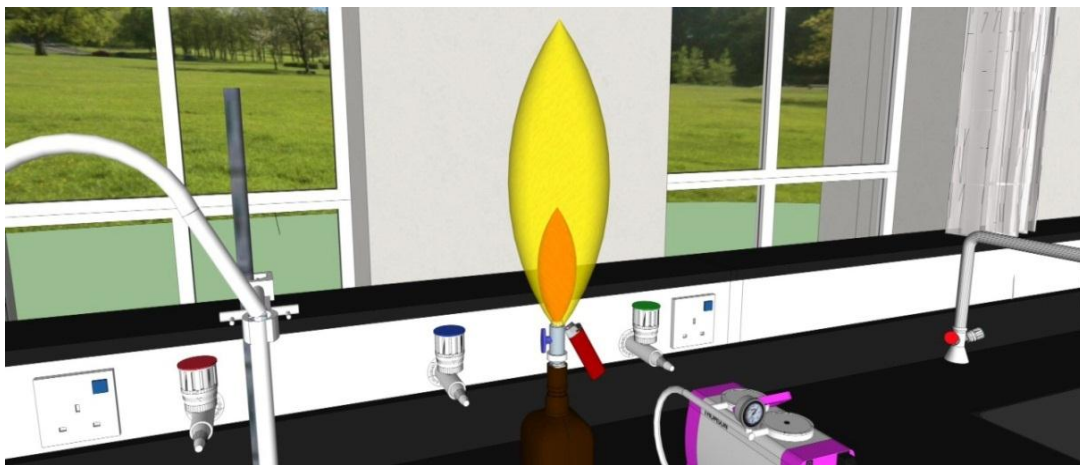


Figura 31. Prueba de llama. Autor

3.5.5. Recolección de Biogás para cromatografía de gases: Utilizando el mismo montaje del punto 3.5.4. , se cambia el balón por una bolsa tipo Tedlar para tomar las muestras para realizar la cromatografía de gases, las muestras se tomaron pasados: siete días, quince días y veintiún días de proceso de digestión anaerobia .Las bolsas son

llevadas a la Universidad Nacional sede Bogotá para ser analizadas en Cromatografo de gases.

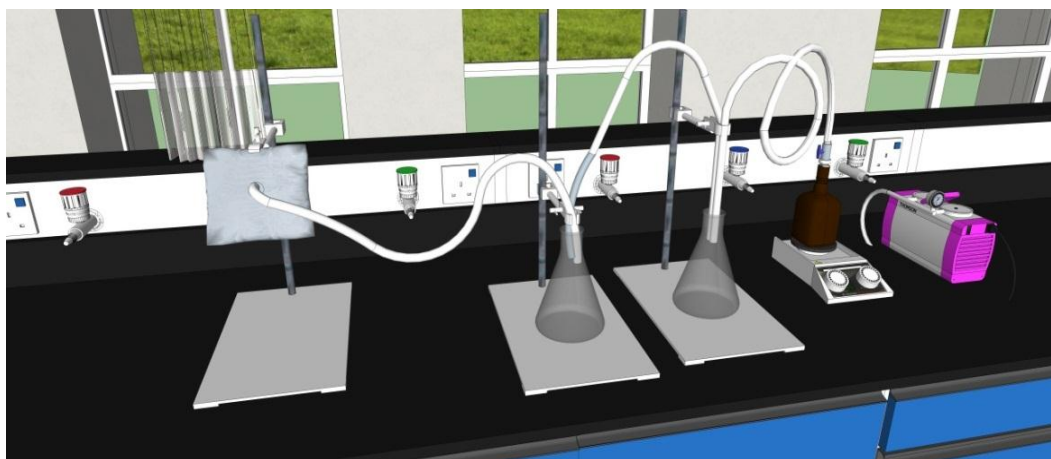


Figura 32. Sistema de recolección de gas para llevar al Cromatògrafo de gases. Autor

4. RESULTADOS Y ANALISIS

Para este trabajo se realizaron cuatro pruebas a nivel de laboratorio, realizando el proceso de digestión anaerobia utilizando tres biodigestores para cada prueba y variando el porcentaje de carga 50/50 y 70/30 (Ruminaza/ agua) y rango de temperatura en el rango mesofílico 30-33°C y 35- 38 °C.

Para todas las pruebas se utilizó la misma biomasa; contenido ruminal de origen bovino, proveniente del centro de beneficio animal del municipio de Nocaima Cundinamarca, la extracción del sustrato se realizó el mismo día del sacrificio y se mantuvo en un bidón de 15 litros a una temperatura de 4^a C en nevera hasta el momento del cargue de los biodigestores.

4.1. Caracterización del contenido ruminal: Los resultados en esta etapa permitieron determinar los parámetros de carga y temperatura que fueron aplicados en los ensayos.

Los datos se encuentran consignados en la tabla 3 (Anexos)

4.1.1. Químicas: Las características Químicas de la biomasa (Cenizas, humedad, sólidos volátiles, PH, densidad y DQO. Los resultados obtenidos evidencian:

- ❖ **Cenizas 3.222%:** Las cenizas son compuestos minerales que no se volatilizan, el resultado obtenido se encuentra por debajo de los datos teóricos que refieren 4.40% en base seca, (Cori, 2006) este resultado indica que el poder calorífico de la biomasa ya que se reduce de acuerdo a su contenido de cenizas. Para el desarrollo del proyecto esta característica del material resulta óptimo para realizar procesos de digestión anaerobia.
- ❖ **Humedad 72.162 %:** La cantidad de agua presente en la biomasa afecta en forma directa la energía disponible del biocombustible obtenido, la humedad de las muestras indica un porcentaje alto de agua y la posibilidad de poder homogenizar la biomasa para iniciar el proceso de digestión anaerobia agregando un volumen bajo de agua. (Rohstoffe, 2010)
- ❖ **Sólidos Volátiles 63.70 %:** Son la porción inorgánica o mineral de los sólidos, para las muestras analizadas el resultado muestra un buen potencial para volatilizarse y transformarse en biogás. La literatura presenta valores guía que pueden utilizarse para estimar el volumen esperado de producción de gas si se conocen el sustrato y el contenido de sólidos volátiles. (Rohstoffe, 2010)
- ❖ **PH 7.44:** Un pH neutro que resulta óptimo para realizar un proceso de digestión anaerobia, la revisión bibliográfica muestra que la mejor producción de metano se produce con un pH, entre 6,5 y 7,7 (Parra-Orobio, Torres-Lozada, & Cárdenas-Cleves, 2014) . Para el procedimiento de producción de biogás no se requiere la utilización de reactivos para neutralizar el PH de la biomasa y evitar la producción excesiva de CO₂.

- ❖ Densidad 0.553 gr/ml: La densidad está muy relacionada con la humedad de la biomasa y sirve como base para determinar el peso de la muestra. Este resultado nos indica la necesidad de tener una agitación continua de la muestra para no formar costra en la parte superior del Biodigestor. (Energía, 2011)
- ❖ DQO 5.235 gr/ml: La Demanda Bioquímica de Oxígeno cuantifica la cantidad de oxígeno requerido para que las sustancias biodegradables presentes en el agua sean destruidas, durante un tiempo de incubación. para el resultado obtenido se refiere a residuos que presentan una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor a 7. 50, estos sustratos se deben tratar con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio. (FAO, 2011)

4.1.2. Físicas: Las características físicas de la biomasa (olor, color y consistencia) son propias de muestras frescas, es una mezcla de alimento no digerido, agua y cantidades significativas de microorganismos. Las características varían dependiendo de factores externos; La alimentación del rumiante está basada en materiales fibrosos como los forrajes y/o materiales de diferente naturaleza como los alimentos concentrados, entre otros. Además, el tiempo entre comidas, consumo de agua son variables del mismo modo que la secreción de saliva, la fermentación, la tasa de pesaje y el volumen y capacidad ruminal. (Vergara-López2, 2007)

4.1.3. Microbiológicas: La tinción Gram indica la presencia de bacilos, bacterias y cocos. El rumen es un ecosistema anaeróbico que presenta características muy particulares en cuanto a población de microorganismos como protozoos, hongos y bacterias que están en simbiosis con el animal hospedero. (Buitrago, 2008).

En el rumen se citan aproximadamente 29 géneros y 63 especies, siendo la mayor parte de estas bacterias anaerobias y no esporulantes. El contenido ruminal está constituido

fundamentalmente por bacterias pequeñas como son bacilos Gram positivos y Gram negativos, formas cocobacilares, cocos, vibrios, bacterias en cadena (estreptococos y estafilococos), y formas semilunares, entre otras. (Stewart & Bryant, 1988.)

La población de hongos en el rumen es alrededor de 10.000 hongos/ml de contenido ruminal y son capaces de digerir las paredes celulares para permitir la acción degradadora de las bacterias (Cruz., Digestion Ruminal, 2001).

Los protozoos representan aproximadamente el 50% de la biomasa microbial del rumen y son una importante, aunque no esencial, población para el rumiante. Los protozoos ciliados, principalmente organismos del rumen, dependen de las proteínas de la dieta y de su degradación parcial en compuestos de bajo peso molecular para su crecimiento, reduciendo de este modo la cantidad de proteína disponible para el animal huésped (and, 1991)

Bacterias que producen metano: Son difíciles de cultivar “in vitro”, su presencia en el rumen es grande, dado que del total de los gases del rumen, el metano está entre el 25-30% de los mismos. Entre estas bacterias se encuentran: *Methanobacterium ruminantium*, *Methanomicrobium mobile*, *Methanobacterium formicum*, *Methanosarcina bakeri* (Stewart & Bryant, 1988.)

Las características fisicoquímicas del contenido ruminal bovino pueden cambiar debido a cuatro factores fundamentales: Fisiología digestiva, composición de la dieta, etapa de crecimiento y sistema de manejo (UPME, Atlas de Biomasa Residual en Colombia, 2011) por esta razón este es el primer paso que permite determinar el potencial de la biomasa para posibles usos energéticos. Las características de las muestras también indican que es un material idóneo para procesos de digestión anaerobia ya que permite el desarrollo de colonias microbianas que hacen posible la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

4.2. Resultados Sistema de biodigestion anaerobio bajo condiciones de laboratorio:

4.2.1 Biodigestores: Se realizaron pruebas con diferentes materiales (plástico, vidrio y acero inoxidable) para lograr establecer un biodigestor que cumpliera con las condiciones de hermeticidad, calentamiento, fácil transporte y resistencia al rango de temperatura.

Para realizar el montaje del experimento, se adaptó como biodigestores tipo Bach de una sola carga cuatro botellas de vidrio color ámbar (este color previene la proliferación de hongos y beneficia el proceso de digestión anaerobia). En una fermentación anaeróbica, la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. (FAO, 2011)



Figura 33. Adaptación Biodigestores. Autor

La temperatura es muy importante en la operación del biodigestor, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. (FAO, 2011) Debido a esto, se debe garantizar una temperatura homogénea en el biodigestor y contar con un sistema adecuado de agitación y un controlador de

temperatura. La agitación de los biodigestores se realizó durante media hora, en una plancha de calentamiento donde se agitaba a 2400 rpm a una temperatura de 35°C mientras se realizaba el proceso de extracción del biogás; efectuando este procedimiento a la misma hora para garantizar uniformidad en la recolección de datos.



Figura 34. Cargue Biodigestores. Autor

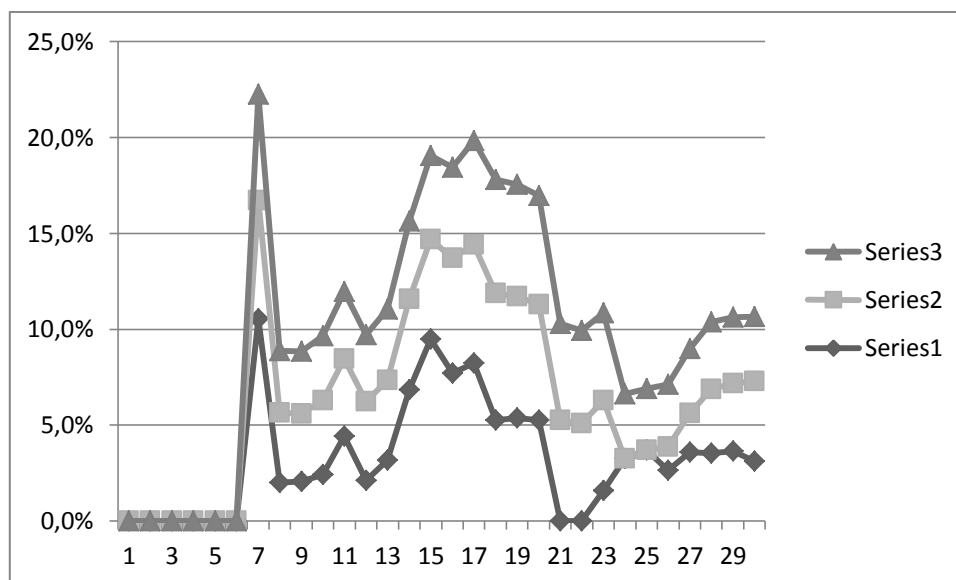


Figura 35. Sellado Biodigestores. Autor

4.2.3. Gasómetro: Para medir el volumen de biogás producido se empleó un método volumétrico utilizando el principio de desplazamiento de un líquido, la extracción de biogás se realizó a diario después de los primeros siete días del proceso. Los datos obtenidos correlacionan de manera estadística el volumen de gas generado por los días de proceso.

4.2.3.1. Prueba 1: La carga 50/50 en proporción contenido ruminal / agua, el rango de temperatura entre 30°C y 33°C y el PH promedio de las muestras fue de 7,43, fue el

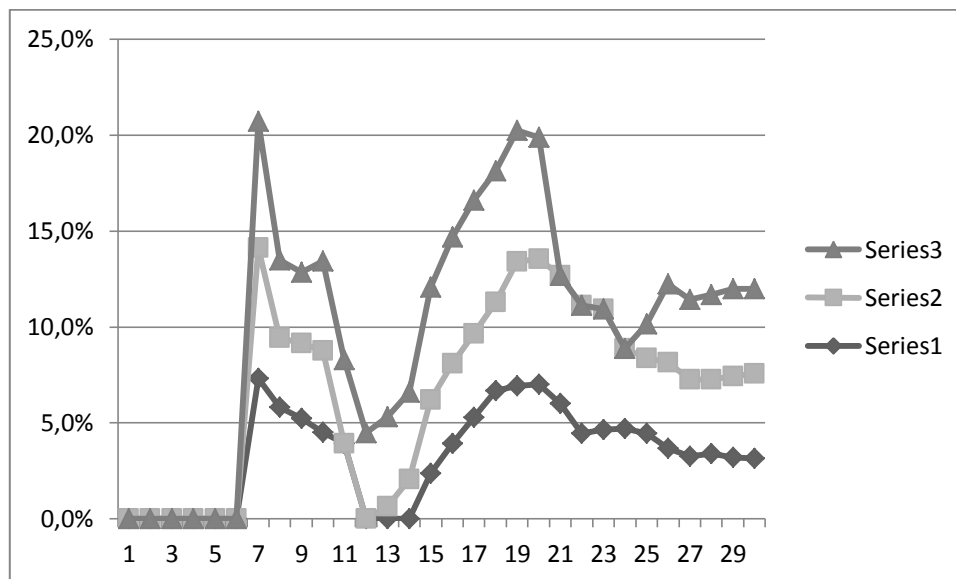
segundo PH más alto pero se mantiene en el rango neutro que resulta óptimo para el proceso de digestión anaerobia. Se generó un promedio acumulado de 1928 ml de biogás después de pasar por las trampas de CO₂ y H₂S, comparado con las otras pruebas fue el segundo volumen más alto en generación de biogás. (Tablas 5-7 anexo). Por otro lado se observa una mayor producción de biogás entre los días 15 y 20 del proceso y luego una caída fuerte que se puede explicar ya que, estudios llevados a cabo por Mc Neil (1954), Bryant (1962), Scott (1990), Brooker (1995) y Dehority, muestran que la actividad microbiana se dirige hacia la producción de ATP y al crecimiento de la misma población microbiana. Cuando hay escasez o limitación de nutrientes, algunos microorganismos mueren rápidamente.



Cuadro 1. Correlación volúmenes prueba1 (50/50 – 31,5°C). Autor

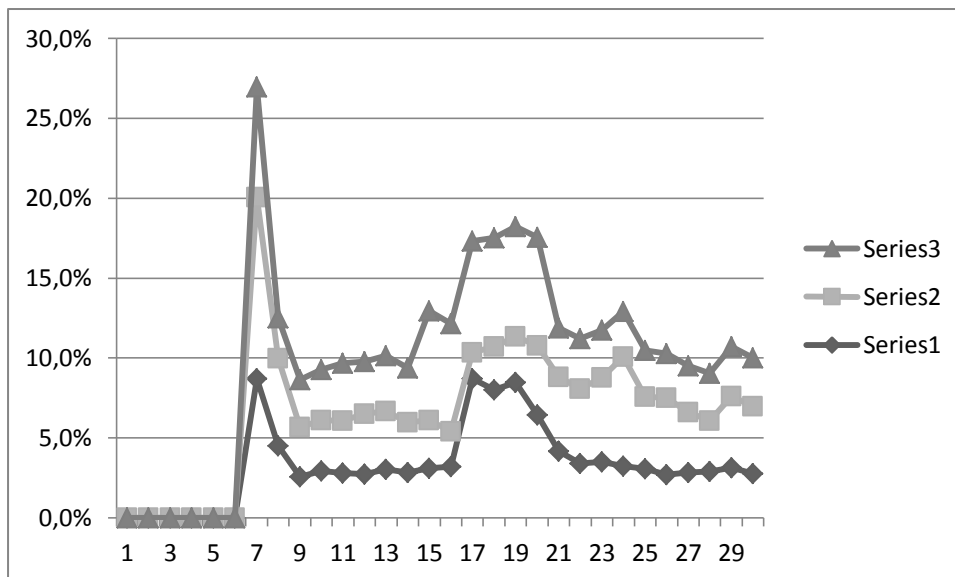
4.2.3.2. Prueba 2: La carga 70/30 en proporción contenido ruminal / agua, el rango de temperatura entre 30°C y 33°C y el PH promedio de las muestras fue de 7,26 fue el PH más bajo registrado durante las pruebas. Se generó un promedio acumulado de 1587 ml de biogás después de pasar por las trampas de CO₂ y H₂S, comparado con las otras pruebas fue el volumen más bajo en generación de biogás. (Tablas 8-10 anexo). A pesar de tener un alto porcentaje de contenido ruminal, el rango de temperatura no

beneficio el proceso de digestión anaerobia, la mayor eficiencia del proceso se ubica en el rango superior del mesofílico y el más bajo de termófilo es decir entre los 35^ac y los 39^ac . (Mantilla, 2005)



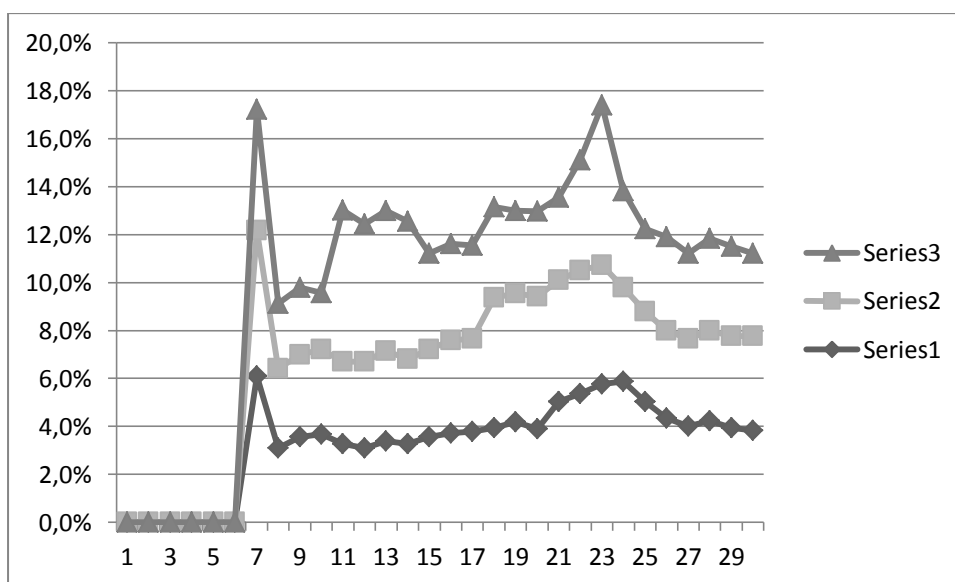
Cuadro2. Correlación volúmenes prueba2 (70/30 – 31,5°C). Autor

4.2.3.3. Prueba 3: La carga 50/50 en proporción contenido ruminal / agua, el rango de temperatura entre 35° y 38° y el PH promedio de las muestras fue de 7,42, segundo promedio más bajo en este parámetro. Se genero un promedio acumulado de 2486 ml de biogás después de pasar por las trampas de CO₂ y H₂S, comparado con las otras pruebas fue el volumen más alto en generación de biogás. (Tablas 11-13 anexo). La proporción 50/50 de porcentaje de carga demostró ser óptima para el proceso de laboratorio y el rango de temperatura 35^a- 38^a promovió la producción de biogás. Esta temperatura es muy similar a las condiciones del ambiente ruminal que están entre los 37^a- 40^a, esto podría explicar la eficiencia de este ensayo, además de ser una mezcla más fluida y fácil de agitar , evitando la compactación del material y la formación de nata que dificulta el desarrollo del proceso.



Cuadro 3. Correlación volúmenes prueba 3 (50/50 – 36,5°C). Autor

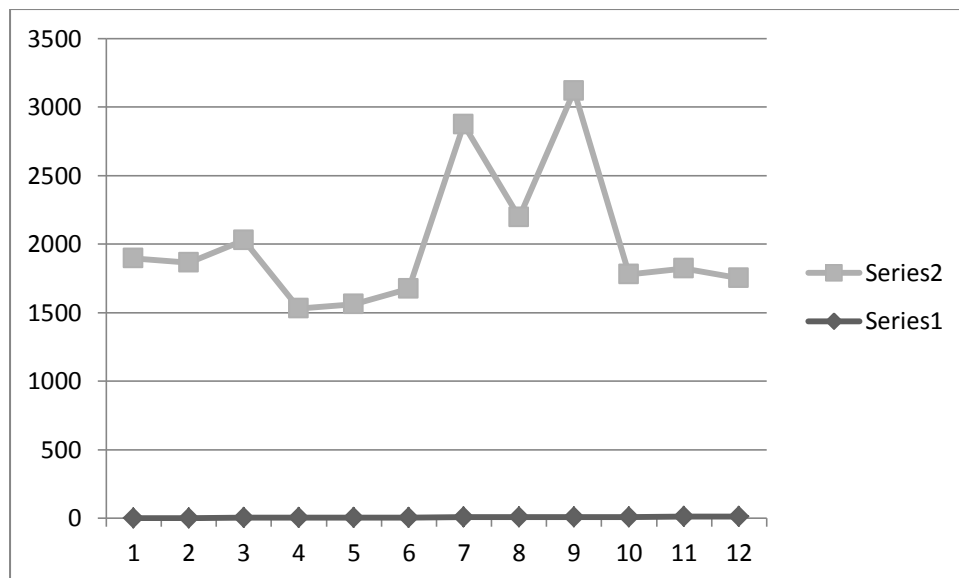
4.2.3.4. Prueba 4: La carga 70/30 en proporción contenido ruminal / agua, el rango de temperatura entre 35°C y 38°C y el PH promedio de las muestras fue de 7,62, registró el promedio más alto para este parámetro. Se generó un promedio acumulado de 1774 ml de biogás después de pasar por las trampas de CO₂ y H₂S, comparado con las otras pruebas fue el segundo volumen más bajo en generación de biogás. (Tablas 14-16 anexo). A pesar de haber tenido un rango de temperatura que promueve el proceso la generación de gas fue baja el material se compactó debido a que la mezcla se hacía demasiado pastosa e impedía la agitación mecánica.



Cuadro 4. Correlación volúmenes prueba 4 (70/30 – 36,5°C). Autor

Los resultados totales evidencian que las condiciones óptimas para la generación de biogás se presentaron en la prueba 3 en el rango de temperatura mesofílico entre 35°C y 38°C y con un porcentaje de carga 50/50 (ruminaza/agua). Cerca de la segunda semana se presentan los mayores volúmenes de biogás en las 12 pruebas realizadas.

Por otra parte se observa interrupciones en la generación de biogás durante el proceso, esto se puede deber a cambios bruscos de temperatura o fallas en la hermeticidad de los biodigestores.



Cuadro 5. Correlación volúmenes acumulados. Autor

4.2.4. Prueba de llama: Esta metodología simple para comprobar de forma cualitativa la generación de biogás en forma directa al abrir la válvula del biodigestor a al acumular en un contenedor el biogás. Las pruebas realizadas una vez a la semana en cada una de las pruebas, mostraron llama de color azulado y de buena consistencia.



Figura 36. Ensayo de la llama. Autor

4.3.Eficiencia del proceso de digestión anaerobia: La evaluación cualitativa de las muestras se realizó con base en los resultados de la etapa previa, es decir se realizaron tres nuevas pruebas con las condiciones determinadas como óptimas para la generación de biogás (carga 50/50 y temperatura 35C-38°C), en dos de ellas se utilizó el sistema de trampas para la purificación del biogás y una se pasó directamente del Biodigestor a la bolsa de extracción. Se realizó la extracción del biogás el día 7 del proceso, utilizando bolsas Tedlar para la recolección y transporte del biogás para su análisis en el laboratorio de ingeniería química de la Universidad Nacional sede Bogotá. En la tabla 19 se presentan los resultados de la cromatografía de gases. (Anexo)



Figura 37. Cromatógrafo de gases UN Bogotá. Autor

Los resultados obtenidos muestran que el biogás producido contiene vapor de agua, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), entre otras sustancias. El sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua del biogás se combinan formando ácido sulfúrico (FAO, 2011). Los ácidos pueden causar corrosión a los motores en que se utiliza biogás, así como los componentes corriente arriba y corriente abajo del motor (tuberías de gas, sistema de escape de gas, etc.). Los componentes con azufre también disminuyen el desempeño de las etapas de purificación corriente abajo (remoción del CO_2) (Desarrollo, 2010).

- ❖ Para las pruebas 1 y 3; donde se utilizaron las trampas para retirar las impurezas (H_2S y CO_2) el contenido de metano se encuentra dentro del rango donde se considera inflamable y con el potencial de ser utilizado para procesos de generación eléctrica y calefacción (Hera, 2013). Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable (FAO, 2011).
- ❖ La prueba 2 evidencia una disminución significativa en el porcentaje de CH_4 y un aumento importante en la proporción de CO_2 y H_2S , el aumento de estos parámetros se pueden atribuir a un aumento el PH de la muestra

(Mantilla, 2005). Estos resultados ratifican la necesidad de utilizar sistemas de purificación del gas para mejorar la eficiencia del proceso. (IPSE, 2015)

- ❖ En la prueba 2 también se puede observar un aumento importante en el porcentaje de Nitrógeno. Los niveles de nutrientes contenidos en la materia orgánica deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El contenido ruminal de origen bovino demuestra ser una fuente muy recomendable para este tipo de procesos.

4.4. Análisis estadístico: Para valorar la producción de biogás a partir de contenido ruminal de origen bovino se realizaron doce pruebas en el tiempo, evaluadas desde el punto objetivo de conocer las diferentes correlaciones presentadas entre las variables temperatura, porcentajes de carga y tiempos de retención. La tabla 19 registra los promedios de producción de biogás en los doce ensayos.

Por lo anterior se determinó las variables temperatura y porcentaje de carga presenta un nivel de afectación sobre la generación de biogás en la digestión anaerobia, promoviendo o dificultando el proceso.

La tabla 24 se relaciona las variables expresadas en los estadísticos generales como media, mediana, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación de las diferentes variables, con base en la frecuencia acumulada de las doce pruebas que se registran en las tablas 20-23

Para las cuatro pruebas realizadas se generó una media armónica de 0,33% sobre el total de 30 días analizados, estos resultados se dan debido a la influencia de estas dos variables en el proceso de digestión anaerobia, demostrando como condiciones de mayor eficiencia del proceso la temperatura máxima en el rango mesofílico 35°C -38°C y una proporción de carga 50% contenido ruminal y 50% Agua destilada.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este trabajo tuvo como objetivo valorar la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia. Principalmente, se pretendió determinar la incidencia sobre la eficiencia del proceso de las dos variables evaluadas: Rango de temperatura y porcentaje de carga, utilizando un residuo de la actividad de beneficio animal, este residuo es sumamente desaprovechado y es causante de contaminación y bajo desempeño ambiental de este sector económico. A continuación, se estarán discutiendo los hallazgos de este trabajo.

De los resultados obtenidos en esta investigación, se puede deducir que en el proceso de digestión anaerobia resulta de gran importancia el monitoreo y control de las variables que intervienen en este proceso, puesto que estas variables están unidas inevitablemente con la estabilidad del proceso en general. Una disminución o aumento en cualquiera de las variables, afecta directamente el metabolismo de las bacterias que intervienen en el proceso, afectando directamente la calidad y cantidad del biogás producido. (Johan Lindmark, 2014)

La temperatura resulta estar directamente relacionada con la velocidad de las reacciones químicas, ya que estas se incrementan por lo general cuando se eleva la temperatura, esto se evidencia en los biodigestores dentro del rango de temperatura tolerado por las bacterias metanogénicas. Una temperatura muy baja o muy elevada puede causar declinación en el ritmo metabólico. El rango de temperatura que presentó el mejor rendimiento en la producción de biogás fue la prueba 3 con una temperatura entre (35°C- 38°C), Gunnerson y Stuckey validan este hallazgo, determinándolo como el rango óptimo para la producción de biogás. Sin embargo algunos residuos orgánicos requieren elevar la temperatura hasta los 55°C, esto limita su aplicabilidad

especialmente en países tropicales donde la disponibilidad de energía limita su aplicabilidad. (Gunnerson, 1986)

El proceso de digestión anaerobia presenta diversos retos para su aplicación, durante el desarrollo del proyecto fue necesario ajustar en varias ocasiones el montaje a utilizar: (tipo de Biodigestor, método de calentamiento, instrumentos para la recolección y medición del gas generado y la metodología para la purificación del mismo. Al ser un montaje a nivel de laboratorio se buscó que cumpliera con ciertas características, tales como ser económico y poder ser replicado para que otros grupos de interés pudieran utilizarlo en futuros trabajos investigativos. (Olivier, 2013)

Un aspecto primordial y que puede ser proyectado a generadores de mayor escala es la purificación del biogás, Tippayawong y Thanompongchart investigaron formas para eliminar el CO₂ y el H₂S, utilizando soluciones acuosas de sales y aminas en una columna cerrada. Los resultados cualitativos de este proyecto demostraron que la alternativa utilizada con trampas de NaOH y limadura de hierro resulta eficiente y sencilla (Olivier¹, 2012).

Este trabajo es un aporte al estudio de energías alternativas, que resulta ser hoy más que nunca una necesidad sentida en amplias zonas de Colombia, donde el sistema interconectado nacional no llega, y hace más grande la brecha tecnológica y social del país. Mediante la Ley 1715 de 2014 se pretende integrar las energías renovables al sistema energético nacional por medio de apoyo a la investigación, transferencia tecnológica y apoyo técnico, este resulta ser un terreno fértil para la investigación y el aporte de los profesionales de las diversas áreas del conocimiento en busca de un mejor país.

6. CONCLUSIONES

La problemática energética actual exige un cambio en las formas de generación energética y promueve la búsqueda de nuevas fuentes de energía aprovechando de manera sostenible recursos y en este caso desechos de otros procesos productivos. Colombia empieza a realizar una apuesta en este sentido por medio de legislación que promueve la producción y el uso de energías alternativas, especialmente direccionadas a zonas no interconectadas; en este sentido el biogás es una excelente alternativa ya que se genera por medio de procesos biológicos, a bajo costo, aprovechando residuos orgánicos aportando no solo a la implementación de energías alternativas para el país sino también al aprovechamiento de desechos que en la mayoría de los casos están causando graves consecuencias ambientales.

1. Las características físicas químicas de la biomasa utilizada posibilita determinar los parámetros a controlar durante el desarrollo de las pruebas que influyen directamente en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.
2. Se evidenció la influencia de la temperatura y la proporción de carga en un sistema de digestión anaerobia reflejada en la calidad y cantidad de biogás producido.
3. El gasómetro utilizado para la medición del volumen de gas, resulta fácil de implementar para proyectos similares, las pruebas realizadas verificaron su correcto funcionamiento, este sistema permite medir el volumen del biogás generado a presión atmosférica y con un error menor al 3%.
4. En el desarrollo del procedimiento experimental se empleó procedimientos para la purificación del biogás, al realizar la cromatografía de gases sobre las muestras

se evidencia la disminución en el porcentaje de contaminantes cuando se utilizan las trampas.

7. El aprovechamiento de residuos orgánicos es una alternativa de solución a la deficiencia energética que tiene Colombia en gran parte de su territorio nacional.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda para generación de biogás a escala semi industrial, utilizando contenido ruminal bajo condiciones del rango de temperatura mesofílico, utilizando biodigestores por lotes tipo cúpula en geomembrana de PVC. La geomembrana es un material manejable y se adapta a las condiciones del trópico húmedo, por lo tanto no traerá problemas a los que deseen aplicar este sistema en la consecución de Biogás. (Olivier, 2013)

Uno de los principales problemas en los biodigestores es que hay una producción de biogás en la parte intermedia del sustrato y en la parte superior se generan unas costras que a corto plazo pueden averiar el biodigestor y disminuir la producción del gas. La recomendación del uso de agitadores continuos con agua es una solución para que la mezcla se mantenga heterogénea, no disminuya la producción del mismo y termine la costra superficial que se forma. (Olivier1, 2012)

Aprovechar los subproductos de la digestión anaeróbica, los cuales presentan grandes beneficios para la producción de fertilizantes foliares, lo cual provee de un valor agregado al productor, es recomendable aprovechar estos efluentes para beneficio propio o venderlo. Estos mismos mejoraran los suelos agrícolas dado que proporcionan una variedad de nutrientes necesarios por los productores primarios en agro ecosistemas.

La implementación de este tipo de procesos es recomendable para suplir las deficiencias energéticas que poseen las granjas, centros de acopio y procesamiento de animales o subproductos de los mismos, puesto que ayuda a realizar un control de la materia orgánica que se produce en estos lugares, brinda una fuente alternativa de energía para sus procesos y mantienen limpio el ambiente.

El validar estas tecnologías es recomendable, fomentando su uso y mostrando sus beneficios en relación a otras formas de producción energética y reciclamiento de nutrientes en el ecosistema; brindar apoyo oportuno y asesoría a las personas o sociedades interesadas es una meta que debe ser trazada por el ministerio de agricultura para hacer que los impactos antrópicos se minimicen en nuestro maltratado ecosistema.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ❖ Guía para la Valorización Energética de Residuos. (2010). Madrid: Fenercom.
- ❖ Producción de Biogás a Partir de Residuos Sólidos Urbanos RSU. (2011). Bogotá Colombia: U.D. .
- ❖ Gand, J. J. (1991). Defaunation of the rumen. Paris Francia: INRA.
- ❖ Annison, E. (1966). El Metabolismo en el Rumen. Mexico D.F. : UTEHA.
- ❖ Bermúdez Gómez Carlos Rodolfo, M. A. (2010). Instrumentación de un Biodigestor de Estiercol Animal para Analizar su Comportamiento Dinámico. Santander: UIS.
- ❖ Buenrostro, O. (2000). La Digestión Anaerobia como Tratamiento a los Residuos Sólidos Orgánicos Generados en los Mercados Municipales. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 19-26.
- ❖ Buitrago, D. A. (2008). Evaluación del contenido ruminal como suplemento alimenticio para el consumo de ganado bovino ensilándolo con lactobacillus casei. Medellín Colombia: Universidad EAFIT.
- ❖ C.A., U. B. (2003). Uso del Contenido Ruminal y Algunos Residuos de la Industria Carnica en la Elaboración de Composta. Bogotá: Tropical and Subtropical Agrosystems.
- ❖ Corpoica. (2010). La Agroenergía en la Región Andina. Bogotá Colombia: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- ❖ Cruz., C. N. (2001). Introducción a la Digestión Ruminal. Mexico: UNAM.

- ❖ DANE. (2015). Encuesta Nacional Agropecuaria. Bogotá: DANE.
- ❖ Desarrollo, M. f. (2010). Guia sobre el Biogas, desde la Produccion hasta el Uso. Berlin Alemania: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit.
- ❖ Dolores Hidalgo, J. M.-M. (2014). Residuos: Las Nuevas Fuentes de Energía y Materias Primas. RETEMA Revista Tècnica de Medio Ambiente, 8-17.
- ❖ Digestión anaeróbica de rúmen bovino en laboratorio y determinación química pre y post tratamiento. Chile: Universidad de los Lagos. E, V. E. (2011).
- ❖ Elias, X. C. (2005). Tratamiento y Valoración Energética de Residuos. España: Diaz de Santos.
- ❖ Energía, I. (. (2007). Biomasa Digestores Anaerobios. Madrid: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).
- ❖ Energía, A. A. (2011). Estudio Básico del Biogàs. Andalucía España: Junta de Andalucía.
- ❖ Fao. (2011). Manual de Biogas. Santiago de Chile:
- ❖ Fedegan. (2015). Produccion Colombia. Bogotá: Federación Colombiana de Ganaderos.
- ❖ Fedesarrollo. (2013). Analisis Costo Beneficio de Energias Renovables no Convencionales en Colombia. Bogotá . Colombia:
- ❖ Fernandez, J. M. (2004). Cambio Climático una Vision desde Mexico. Mexico : Instituto Nacional de Ecología.

- ❖ Gastaldi, R. L. (2010). Concentraciones de los Ácidos Grasos Volátiles en el Rumen de Bovinos Alimentados con Diferentes Diets de las estimativas de Emisiones de Metano para el Medio Ambiente. Sao Pablo: Congreso Nacional de Medio Ambiente .
- ❖ Gon, L. M. (2008). Transferencia y Aplicación de Dos Alternativas de Manejo y Disposición Final de Residuos Orgánicos Generados en Explotaciones Agropecuarias de la zona de la ciudad de Crespo, Entre Ríos. Entre Rios Argemntina: Universidad Catòlica de Santa fe.
- ❖ Hera, C. R. (2013). Plantas de Biogas. Cantabria España: Universidad de Cantabria.
- ❖ Johan Lindmark, P. E. (2014). The effects of different mixing intensities during anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. Västerås, Sweden: Mälardalen University.
- ❖ L.A. Uicab-Brito, C. S. (2003). Uso del contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta. Yucatan Mexico: Universidad Autònoma de Yucatan .
- ❖ L.G, T. (2006). Analisis fisico-quimicos de los contenidos ruminales frescos y ensilados de bovinos sacrificados en el Valle del César. Valledupar Cesar: UPC.
- ❖ Loening, A. (2003). Landfill Gas and Related Energy Sources: Anaerobic Biomass Energy Systems. Reino Unido: The Royal Society of Chemistry.
- ❖ Lucia., m. M. (2011). PurificaciÓn Biológica de Biogas. Santiago de chile : universidad de chile.

- ❖ Luis, O. (1994). Energias Xilogenadas . Vigo. España.
- ❖ Mantilla, C. L. (2005). Produccion de Biomasa Microbiana con Caracteristicas Probiòticas para mejorar la Fermentaciòn Ruminla. Bucaramanga Santander: UIS.
- ❖ Maria Westerholm, S. R. (2010). Syntrophaceticus schinkii gen.nov., sp.nov., ananaerobic,syntrophic acetate-oxidizing bacteriumisolated fromamesophilic anaerobicølter. Uppsala, Suesia: Blackwell Publishing Ltd.
- ❖ Martinez, G. L. (2011). Produccion de Biogas a partir de RSU. Bogotà: Universidad Distrital Francisco Josè de Caldas.
- ❖ Mena M, B. J. (2007). Metodologia de bajo costo para la cuantificaciòn de biogas en biodigestores de laboratorio. Avances en energias renovables y medio ambiente, 11-18.
- ❖ Milton Ríos V., L. R. (2012). Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para ceba cunicola,como estrategia para diezmar la contaminación generada por el matadero en San Alberto. San Alberto Cesar: UNAD.
- ❖ Mitzlaff, K. v. (1988). Engines for biogas. Alemania: Deutsches Zentrum für.
- ❖ Norton, R. (2011). Diseño de Màquinas. Mexioc D.F.: Prentice Hall.
- ❖ Olivier1, J. R. (2012). Degradaciòn anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtenciòn de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. Revista Académica de la FI-UADY, 57-65.
- ❖ ONU. (1998). Protocolo de Kioto de la convension marco de las naciones unidas sobre el cambio climàtico. Washington: ONU.

- ❖ Parra-Orobio, B., Torres-Lozada, P. M.-R., & Cárdenas-Cleves, L. (2014). Influencia del PH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 553-562.
- ❖ Peace, G. (2011). *Gasificación, Pirólisis y Plasma. Nuevas Tecnologías para el Tratamiento de Residuos Urbanos*. Argentina : Green Peace.
- ❖ Penichelli, F. R. (2005). *Software para la Evaluación Técnica Económica Financiera de Biodigestores Rurales*. Argentina: Instituto de Ingeniería Rural.
- ❖ Polo, J. F. (2013). *Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales*. Mexico: Alfaomega.
- ❖ Peace, G. (2011). *Gasificación, Pirólisis y Plasma. Nuevas Tecnologías para el Tratamiento de Residuos Urbanos*. Argentina: Green Peace.
- ❖ Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona España: Revertè, S.A.
- ❖ Rohstoffe, F. N. (2010). *Guía sobre el Biogas .Desde la Producción hasta el Uso*. Alemania: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) con el apoyo del Ministerio Federal de Alimentación, Agricultura y Protección al Consumidor en base a una decisión del Parlamento de la República Federal Alemana.
- ❖ Sagarpa. (2013). *Especificaciones Técnicas para Biodigestores Pequeños tipo Laguna* . Mexico: SAGARPA.
- ❖ Solari, G. (2004). *Construcción de un Sistema de Digestión Batch de 10 m³*. Lima Peru: Universidad Alas Peruanas.

- ❖ Stewart, C., & Bryant, M. (1988.). The rumen bacteria. Londres. Inglaterra: Elsevier Applied Science.
- ❖ Tchobanoglous, G. (1998). Gestion Integral de Residuos Sólidos. Madrid España: Impresos y Revistas S. A.
- ❖ Upme. (2011). Atlas de Biomasa Residual Colombia. Bogotá: Colciencias.
- ❖ Upme. (2015). Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050. Bogotá . Colombia: UPME.
- ❖ Uribe, E. (2003). Subproductos y Aguas Residuales en las Plantas de Beneficio de Bovinos y Porcinos. Bogotá: CAR.
- ❖ V, F. V. (1999). El contenido Ruminal como Alimento para Cerdos. Piedecuesta Santander: SENA.
- ❖ Vergara-López², O. A. (2007). Propiedades físicas y químicas del rumen. Cusco-Perú: XX Reunión ALPA, XXX Reunión APPA Cusco-Perú.

9. ANEXOS:

Tabla 1. Parámetros de control. Autor

Parámetros de control	
Mezcla Biodigestor	
Parámetro	Frecuencia de medida
Temperatura mezcla	Diaria
% carga	Mensual
PH	Mensual
DQO	Mensual
Gas producido	
Parámetro	Frecuencia de medida
Volumen de gas	Diaria
Prueba de llama	Semanal
Composición	Mensual

Tabla 2. Componentes del Biogás en función del sustrato utilizado. Autor.

<i>Característica</i>	<i>Resultado 1</i>	<i>Resultado 2</i>	<i>Resultado 3</i>	<i>Promedio</i>
<i>Cenizas</i>	3365%	3051%	3251%	3222%
<i>Humedad</i>	71723%	72976%	71789%	72162%
<i>Sólidos Volátiles</i>	64.37%p/p	63.67 p/p	63.07 p/p	63.70 p/p
<i>PH</i>	7.456	7.309	7.571	7.445
<i>Densidad</i>	0.523 gr/ml	0.549 gr/ml	0.589 gr/ml	0.553 gr/ml
<i>DQO</i>	5.235 gr/l	5.278 gr/l	5.194 gr/l	5.235 gr/l
<i>Tinción Gram</i>	<i>Bacilos, cocos y hongos con sustrato metanògenos y celulosa</i>			
<i>Olor</i>	<i>Desagradable</i>			
<i>Color</i>	<i>Café verdoso</i>			
<i>Consistencia</i>	<i>Semipastoso</i>			

Tabla 3. Resultados caracterización de la Biomasa. Autor

Compuesto	Res. Ganaderos	Res. Agrícolas	Fangos PTAR	RSU
Metano CH ₄	50-80 %	50-80 %	50-80 %	50-70%
Dióxido de Carbono CO ₂	30-50 %	30-50 %	20-50 %	30-50 %
Nitrógeno N	0,5-3 %	0,5-3 %	0-3 %	0,5-3 %
Sulfuro de Hidrógeno	0,1-1 %	100-700 ppm	0,1-1 %	0,1-8 %
Vapor de agua	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Amoniaco	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Oxígeno	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-1 %

Tabla 4. Materiales y equipos. Autor.

<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>
<i>Biodigestor Laboratorio</i>	<i>4</i>
<i>Espátula</i>	<i>6*</i>
<i>Crisol</i>	<i>3*</i>
<i>Tubo de ensayo</i>	<i>6*</i>
<i>Ágitadores magnéticos</i>	<i>8*</i>
<i>Cajas de Petri</i>	<i>3*</i>
<i>Beaker 250 ml</i>	<i>6*</i>
<i>Desecador de vidrio con llave y placa</i>	<i>1*</i>
<i>Termómetro digital</i>	<i>1*</i>
<i>Erlenmeyer 500 ml</i>	<i>2</i>
<i>Probeta 500 ml</i>	<i>2</i>
<i>Probeta 250 ml</i>	<i>2</i>
<i>Manguera de 2"</i>	<i>10 mt</i>
<i>Corchos</i>	<i>2</i>
<i>Balón Aforado 500 ml</i>	<i>2</i>
<i>PH metro Oakton</i>	<i>1*</i>
<i>Oxímetro Oakton</i>	<i>1*</i>
<i>Horno Memmet</i>	<i>1*</i>
<i>Plancha de calentamiento</i>	<i>1*</i>
<i>Cromatgrafo de Gases</i>	<i>1</i>
<i>Agua destilada</i>	<i>20 litros</i>
<i>Contenido ruminal</i>	<i>50 litros</i>
<i>Hidróxido de sodio</i>	<i>1 kilo</i>
<i>Limadura de Hiero</i>	<i>500 gr</i>
<i>Violeta de genciana</i>	<i>100 gr</i>
<i>Fucsina</i>	<i>100 gr</i>
<i>Alcohol etílico</i>	<i>500ml</i>
<i>Lugol</i>	<i>100ml</i>

Tabla 5. Variables medidas. Autor

Variables	Unidades	Pruebas
Tiempo de retención	30 días	12
Temperatura	30°C-33°C	3
	35°C -38°C	3
Porcentaje de carga	50%/50 %	3
	70%/30%	3

Tabla 6. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 1. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 1								
CARGA 50/50 TEMPERATURA 30-33 °C								
Dia	Total	Acumulado	Dia	Total	Acumulado	Dia	Total	Acumulado
1	0	0	11	84 ml	407 ml	21	0ml	1421 ml
2	0	0	12	40 ml	447 ml	22	0m ml	1421 ml
3	0	0	13	60 ml	507 ml	23	30 ml	1451 ml
4	0	0	14	130 ml	637 ml	24	62 ml	1513 ml
5	0	0	15	180 ml	817 ml	25	70 ml	1583 ml
6	0	0	16	146 ml	963 ml	26	50 ml	1633 ml
7	200 ml	200 ml	17	156 ml	1119 ml	27	68 ml	1701 ml
8	38 ml	238 ml	18	100 ml	1219 ml	28	67 ml	1768 ml
9	39 ml	277 ml	19	102 ml	1321 ml	29	69 ml	1837 ml
10	46 ml	323 ml	20	100 ml	1421 ml	30	59 ml	1896 ml
Ph MUESTRA 7.06								

Tabla 7. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 1. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 2								
CARGA 50/50 TEMPERATURA 30-33 °C								
Dia	Total	Acumulado	Dia	Total	Acumulado	Dia	Total	Acumulado
1	0	0	11	75ml	396 ml	21	98ml	1414 ml
2	0	0	12	77ml	473 ml	22	95ml	1509 ml
3	0	0	13	78ml	551 ml	23	88l	1597 ml
4	0	0	14	88ml	639 ml	24	0	1597 ml
5	0	0	15	97ml	736 ml	25	0	1597 ml
6	0	0	16	112ml	848 ml	26	23ml	1620 ml
7	115ml	115	17	115ml	963 ml	27	38ml	1658 ml
8	68ml	183	18	123ml	1086 ml	28	62ml	1720 ml
9	66ml	249	19	118ml	1204 ml	29	66ml	1786 ml
10	72ml	321	20	112ml	1316 ml	30	78ml	1864 ml
Ph MUESTRA 7.53								

Tabla 8. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 1. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 3								
CARGA 50/50 TEMPERATURA 30-33 °C								
Dia	Total	Acumulado	Dia	Total	Acumulado	Dia	Total	Acumulado
1	0	0	11	71ml	382 ml	21	102ml	1358 ml
2	0	0	12	70ml	452 ml	22	98ml	1456 ml
3	0	0	13	75ml	527 ml	23	92ml	1548 ml
4	0	0	14	82ml	609 ml	24	68ml	1616 ml
5	0	0	15	88ml	697 ml	25	65ml	1681 ml
6	0	0	16	96ml	793 ml	26	66ml	1747 ml
7	112ml	112	17	110ml	903 ml	27	68ml	1815 ml
8	65ml	177	18	120ml	1023 ml	28	71ml	1886 ml
9	66ml	243	19	118ml	1141 ml	29	70ml	1956 ml
10	68ml	311	20	115ml	1256 ml	30	68ml	2024 ml
Ph MUESTRA 7.71								

Tabla 9. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 2. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 1								
CARGA 70/30 TEMPERATURA 30-33 ° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	60	410 ml	21	92	994 ml
2	0	0	12	0	410 ml	22	68	1062 ml
3	0	0	13	0	410 ml	23	71	1133 ml
4	0	0	14	0	410 ml	24	72	1205 ml
5	0	0	15	36	446 ml	25	68	1273 ml
6	0	0	16	60	506 ml	26	56	1329 ml
7	112ml	112 ml	17	81	587 ml	27	50	1379 ml
8	89ml	201 ml	18	102	689 ml	28	52	1431 ml
9	80ml	281 ml	19	106	795 ml	29	49	1480 ml
10	69ml	350 ml	20	107	902 ml	30	48	1528 ml
Ph MUESTRA 7.25								

Tabla 10. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 2. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO PRUEBA 2								
CARGA 70/30 TEMPERATURA 30-33 ° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	0 ml	289 ml	21	104 ml	903 ml
2	0	0	12	0 ml	289 ml	22	104 ml	1007 ml
3	0	0	13	10 ml	299 ml	23	98 ml	1105 ml
4	0	0	14	32 ml	331 ml	24	65 ml	1170 ml
5	0	0	15	60 ml	391 ml	25	61 ml	1231 ml
6	0	0	16	65 ml	456 ml	26	70 ml	1301 ml
7	106 ml	106 ml	17	68 ml	524 ml	27	62 ml	1363 ml
8	56 ml	162 ml	18	72 ml	596 ml	28	60 ml	1423 ml
9	61 ml	223 ml	19	101 ml	697 ml	29	66 ml	1489 ml
10	66 ml	289 ml	20	102 ml	799 ml	30	69 ml	1558 ml
Ph MUESTRA 6.98								

Tabla 11. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 2. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 3								
CARGA 70/30 TEMPERATURA 30-33 ° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	73 ml	396 ml	21	0ml	1283 ml
2	0	0	12	75 ml	471 ml	22	0 ml	1283 ml
3	0	0	13	78 ml	549 ml	23	0 ml	1283 ml
4	0	0	14	76 ml	625 ml	24	0 ml	1283 ml
5	0	0	15	98 ml	723 ml	25	30 ml	1313 ml
6	0	0	16	110 ml	833 ml	26	68 ml	1381 ml
7	110 ml	110 ml	17	116 ml	949 ml	27	70 ml	1451 ml
8	68ml	178 ml	18	114 ml	1063 ml	28	74 ml	1525 ml
9	62 ml	240 ml	19	114 ml	1177 ml	29	76 ml	1601 ml
10	78 ml	318 ml	20	106 ml	1283 ml	30	74 ml	1675 ml
Ph MUESTRA 7.56								

Tabla 12. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 3. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 1								
CARGA 50/50 TEMPERATURA 35-38° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	81 ml	618 ml	21	120 ml	2075 ml
2	0	0	12	79 ml	697 ml	22	98 ml	2173 ml
3	0	0	13	87 ml	784 ml	23	101 ml	2283 ml
4	0	0	14	82 ml	866 ml	24	93 ml	2376 ml
5	0	0	15	89 ml	955 ml	25	88 ml	2464 ml
6	0	0	16	92 ml	1047 ml	26	78 ml	2542 ml
7	250 ml	250 ml	17	250 ml	1297 ml	27	82 ml	2624 ml
8	129 ml	379 ml	18	230 ml	1527 ml	28	83 ml	2707 ml
9	74 ml	453 ml	19	243 ml	1770 ml	29	90 ml	2797 ml
10	84 ml	537 ml	20	185 ml	1955 ml	30	80 ml	2877 ml
Ph MUESTRA 7.33								

Tabla 13. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 3. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 2								
CARGA 50/50 TEMPERATURA 35-38° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	71 ml	577 ml	21	101 ml	1161 ml
2	0	0	12	82 ml	659 ml	22	102 ml	1263 ml
3	0	0	13	80 ml	739 ml	23	115 ml	1378 ml
4	0	0	14	68 ml	807 ml	24	150 ml	1528 ml
5	0	0	15	0 ml	807 ml	25	99 ml	1627 ml
6	0	0	16	0 ml	807 ml	26	105 ml	1732 ml
7	248 ml	248 ml	17	36 ml	843 ml	27	82 ml	1814 ml
8	120 ml	368 ml	18	59 ml	902 ml	28	70 ml	1884 ml
9	68 ml	436 ml	19	63 ml	965 ml	29	98 ml	1982 ml
10	70 ml	506 ml	20	95 ml	1060 ml	30	92 ml	2074 ml
Ph MUESTRA 7.89								

Tabla 14. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 3. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 3								
CARGA 50/50 TEMPERATURA 35-38° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	112 ml	596 ml	21	96 ml	2282 ml
2	0	0	12	102 ml	698 ml	22	98 ml	2380 ml
3	0	0	13	108 ml	806 ml	23	92 ml	2472 ml
4	0	0	14	106 ml	912 ml	24	88 ml	2560 ml
5	0	0	15	212 ml	1124 ml	25	90 ml	2650 ml
6	0	0	16	210 ml	1334 ml	26	86 ml	2736 ml
7	215 ml	215 ml	17	216 ml	1550 ml	27	90 ml	2826 ml
8	79 ml	294 ml	18	212 ml	1762 ml	28	92 ml	2918 ml
9	92 ml	386 ml	19	214 ml	1976 ml	29	96 ml	3014 ml
10	98 ml	484 ml	20	210 ml	2186 ml	30	94 ml	3108 ml
Ph MUESTRA 7.06								

Tabla 15. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 4. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 1								
CARGA 70/30 TEMPERATURA 35-38° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	58 ml	349 ml	21	89 ml	1020 ml
2	0	0	12	55 ml	404 ml	22	95 ml	1115 ml
3	0	0	13	60 ml	464 ml	23	102 ml	1217 ml
4	0	0	14	58 ml	522 ml	24	104 ml	1321 ml
5	0	0	15	63 ml	585 ml	25	89 ml	1410 ml
6	0	0	16	66 ml	651 ml	26	77 ml	1487 ml
7	108 ml	108 ml	17	67 ml	718 ml	27	71 ml	1558 ml
8	55 ml	163 ml	18	70 ml	788 ml	28	75 ml	1633 ml
9	63 ml	226 ml	19	74 ml	862 ml	29	70 ml	1703 ml
10	65 ml	291 ml	20	69 ml	931 ml	30	68 ml	1771 ml
Ph MUESTRA 7.46								

Tabla 16. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 4. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 2								
CARGA 70/30 TEMPERATURA 35-38° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	62 ml	358 ml	21	92 ml	1148 ml
2	0	0	12	65 ml	423 ml	22	93 ml	1241 ml
3	0	0	13	68 ml	491 ml	23	90 ml	1331 ml
4	0	0	14	64 ml	555 ml	24	71 ml	1402 ml
5	0	0	15	66 ml	621 ml	25	68 ml	1470 ml
6	0	0	16	70 ml	691 ml	26	66ml	1536 ml
7	110 ml	110 ml	17	70 ml	761 ml	27	66 ml	1602 ml
8	60 ml	170 ml	18	98 ml	859 ml	28	68 ml	1670 ml
9	62 ml	232 ml	19	97 ml	956 ml	29	69 ml	1739 ml
10	64 ml	296 ml	20	100 ml	1056 ml	30	71 ml	1810 ml
Ph MUESTRA 7.87								

Tabla 17. Volúmenes de Biogás generados. Prueba 4. Autor

VOLUMEN DE BIOGAS GENERADO 3								
CARGA 70/30 TEMPERATURA 35-38° C								
Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado	Día	Total	Acumulado
1	0	0	11	110 ml	335 ml	21	60 ml	1093 ml
2	0	0	12	100 ml	435 ml	22	80 ml	1173 ml
3	0	0	13	102 ml	537 ml	23	116 ml	1289 ml
4	0	0	14	100 ml	637 ml	24	70 ml	1359 ml
5	0	0	15	70 ml	707 ml	25	60 ml	1419 ml
6	0	0	16	70 ml	777 ml	26	68 ml	1487 ml
7	88 ml	88 ml	17	68 ml	845 ml	27	62 ml	1549 ml
8	47 ml	135 ml	18	66 ml	911 ml	28	67 ml	1616 ml
9	49 ml	184 ml	19	60 ml	971 ml	29	65 ml	1681 ml
10	41 ml	225 ml	20	62 ml	1033 ml	30	60 ml	1741 ml
Ph MUESTRA 7.55								

Tabla 18. Resultados Cromatografía de gases. Autor

COMPUESTO	PRUEBA 1 TRAMPA	PRUEBA 2 ST	PRUEBA 3 TRAMPA
H ₂ S	0,02%	0,09%	0,01%
CO ₂	19,06%	47,69%	12,53%
N ₂	17,66%	24,80%	6,55%
CH ₄	43,16%	21,66%	53,38%
CO	0,00%	0,00%	0,00%
O ₂ + H ₂ O	20,13%	5,85%	27,55%

Tabla 19. Promedio de biogás generado. Doce ensayos. Autor.

	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Prueba 1	1896	1864	2024
Prueba 2	1528	1558	1670
Prueba 3	2868	2188	3108
Prueba 4	1771	1810	1741

Tabla 20. Frecuencia Acumulada. Prueba 1. Autor.

PRUEBA 1			
Día	FAC	FAC	FAC
0	100,0%	100,0%	100,0%
1	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%
7	10,5%	6,2%	5,5%
8	2,0%	3,6%	3,2%
9	2,1%	3,5%	3,3%
10	2,4%	3,9%	3,4%
11	4,4%	4,0%	3,5%
12	2,1%	4,1%	3,5%
13	3,2%	4,2%	3,7%
14	6,9%	4,7%	4,1%
15	9,5%	5,2%	4,3%
16	7,7%	6,0%	4,7%
17	8,2%	6,2%	5,4%
18	5,3%	6,6%	5,9%
19	5,4%	6,3%	5,8%
20	5,3%	6,0%	5,7%
21	0,0%	5,3%	5,0%
22	0,0%	5,1%	4,8%
23	1,6%	4,7%	4,5%
24	3,3%	0,0%	3,4%
25	3,7%	0,0%	3,2%
26	2,6%	1,2%	3,3%
27	3,6%	2,0%	3,4%
28	3,5%	3,3%	3,5%
29	3,6%	3,5%	3,5%
30	3,1%	4,2%	3,4%

Tabla 21. Frecuencia Acumulada. Prueba 2. Autor.

PRUEBA 2			
Día	FAC	FAC	FAC
0	100,0%	100,0%	100,0%
1	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%
7	7,3%	6,8%	6,6%
8	5,8%	3,6%	4,1%
9	5,2%	3,9%	3,7%
10	4,5%	4,2%	4,7%
11	3,9%	0,0%	4,4%
12	0,0%	0,0%	4,5%
13	0,0%	0,6%	4,7%
14	0,0%	2,1%	4,6%
15	2,4%	3,9%	5,9%
16	3,9%	4,2%	6,6%
17	5,3%	4,4%	6,9%
18	6,7%	4,6%	6,8%
19	6,9%	6,5%	6,8%
20	7,0%	6,5%	6,3%
21	6,0%	6,7%	0,0%
22	4,5%	6,7%	0,0%
23	4,6%	6,3%	0,0%
24	4,7%	4,2%	0,0%
25	4,5%	3,9%	1,8%
26	3,7%	4,5%	4,1%
27	3,3%	4,0%	4,2%
28	3,4%	3,9%	4,4%
29	3,2%	4,2%	4,6%
30	3,1%	4,4%	4,4%

Tabla 22. Frecuencia Acumulada. Prueba 3. Autor.

PRUEBA 3			
Día	FAC	FAC	FAC
0	100,0%	100,0%	100,0%
1	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%
7	8,7%	11,3%	6,9%
8	4,5%	5,5%	2,5%
9	2,6%	3,1%	3,0%
10	2,9%	3,2%	3,2%
11	2,8%	3,2%	3,6%
12	2,8%	3,7%	3,3%
13	3,0%	3,7%	3,5%
14	2,9%	3,1%	3,4%
15	3,1%	3,0%	6,8%
16	3,2%	2,2%	6,8%
17	8,7%	1,6%	6,9%
18	8,0%	2,7%	6,8%
19	8,5%	2,9%	6,9%
20	6,5%	4,3%	6,8%
21	4,2%	4,6%	3,1%
22	3,4%	4,7%	3,2%
23	3,5%	5,3%	3,0%
24	3,2%	6,9%	2,8%
25	3,1%	4,5%	2,9%
26	2,7%	4,8%	2,8%
27	2,9%	3,7%	2,9%
28	2,9%	3,2%	3,0%
29	3,1%	4,5%	3,1%
30	2,8%	4,2%	3,0%

Tabla 23. Frecuencia Acumulada. Prueba 4. Autor.

PRUEBA 4			
Día	FAC	FAC	FAC
0	100,0%	100,0%	100,0%
1	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%
7	6,1%	6,1%	5,1%
8	3,1%	3,3%	2,7%
9	3,6%	3,4%	2,8%
10	3,7%	3,5%	2,4%
11	3,3%	3,4%	6,3%
12	3,1%	3,6%	5,7%
13	3,4%	3,8%	5,9%
14	3,3%	3,5%	5,7%
15	3,6%	3,6%	4,0%
16	3,7%	3,9%	4,0%
17	3,8%	3,9%	3,9%
18	4,0%	5,4%	3,8%
19	4,2%	5,4%	3,4%
20	3,9%	5,5%	3,6%
21	5,0%	5,1%	3,4%
22	5,4%	5,1%	4,6%
23	5,8%	5,0%	6,7%
24	5,9%	3,9%	4,0%
25	5,0%	3,8%	3,4%
26	4,3%	3,6%	3,9%
27	4,0%	3,6%	3,6%
28	4,2%	3,8%	3,8%
29	4,0%	3,8%	3,7%
30	3,8%	3,9%	3,4%

Tabla 24. Resultado análisis estadístico. Autor

Medidas	Prueba 1 (a)	Prueba 1(b)	Prueba 1 ©	Prueba 2 (a)	Prueba 2(b)	Prueba 2 ©	Prueba 3 (a)	Prueba 3 (b)	Prueba 3 ©	Prueba 4 (a)	Prueba 4(b)	Prueba 4 ©
Media	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	0,0333 3333	60,333 3333	58,033 3333
Varianza	0,0008 86	0,0005 5934	0,0003 6163	0,0006 3401	0,0005 9014	0,0006 9293	177,51 8621	0,0006 3401	0,0005 3573	0,0003 5011	0,0003 4114	1188,4 4713
Desviación Estándar	0,0297 6569	0,0236 504	0,0190 1648	0,0251 7951	0,0242 9274	0,0263 2352	72,976 4251	52,495 6046	0,0231 4577	33,137 6266	33,430 6625	0,0198 0118
Mediana	0,0313 8186	0,0394 3133	0,0345 8498	0,0379 5812	0,0394 7368	0,0428 1437	0,0298 1172	0,0322 2121	0,0305 6628	0,0375 4941	0,0370 1657	0,0364 7329
Coefficiente de Variación	0,8929 7062	0,7095 1207	0,5704 9428	0,7553 8534	0,7287 8228	0,7897 0553	2189,2 9275	1574,8 6814	0,6943 7299	994,12 8799	0,5540 9938	0,0003 412