



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD CIENCIAS QUÍMICAS

ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS
PECUARIOS, EMPLEANDO LA GLICERINA COMO SUBPRODUCTO DE LA
OBTENCIÓN DE BIODIESEL”.**

Trabajo de titulación Previo
a la Obtención del Título
de: Ingeniero Químico

AUTORA:

Ana Belén Escobar Cobos

C.I: 0104765888

DIRECTOR:

Ing. Juan José Vázquez Guillén, Mgs.

CI: 0104053863

Cuenca - Ecuador

2018



RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, comprobar la viabilidad técnica del aprovechamiento energético de residuos pecuarios, y de la glicerina obtenida como subproducto de la producción de biodiesel, que utiliza el proceso de co-digestión anaerobia para la generación de biogás.

De acuerdo a lo planteado, se trabajó a temperaturas de 35 y 45 °C, con dos sustratos (estiércol de vaca y cerdo) a las cuales se les adicionó glicerina, que por su alto contenido de carbono fácilmente degradable, actúa como co-sustrato potencializando el rendimiento en la producción de biogás. Estas variables fueron previamente seleccionadas, y se sometieron a una evaluación estadística, mediante un diseño experimental 2^k, para así observar su efecto en la obtención de este biocombustible y así encontrar el modelo óptimo.

El procedimiento se llevó a cabo en 10 biodigestores adaptados a las condiciones de laboratorio necesarias para su monitoreo. La técnica de Actividad Metanogénica Específica (AME) fue el método que se utilizó para la cuantificación de biogás, la cual consistió en utilizar hidróxido de sodio que secuestra dióxido de carbono y deja pasar gas metano. Se obtuvo un incremento del 70 % en el rendimiento al trabajar con estiércol porcino, con 4% de glicerina y a una temperatura de 45°C,

Palabras claves: biogás, biodiesel, glicerina, co-digestión anaerobia, diseño experimental, sustrato, co-sustrato, biodigestor.



ABSTRACT

The main objective of the following research is to prove the technical feasibility of utilizing the energy from the combination of livestock waste and of the glycerin obtained as a byproduct of the production of biodiesel, which uses the anaerobic co-digestion process for the generation of biogas.

According to this proposal, it was worked at temperatures of 35° and 45° C, with two substrates (cow and swine manure) plus the addition of glycerin, which acted as a co-substrate due to its high content of easily-degradable carbon, potentiating the performance in the production of biogas. These variables were previously selected and were subjected to a statistical evaluation using an experimental 2^K design in order to observe their effect in obtaining this biofuel and find the optimal model.

The procedure was carried out in 10 biodigesters adapted to the laboratory conditions necessary for their monitoring. The technique of Specific Methanogenic Activity (SMA) was the method used to quantify biogas, which consisted of using sodium hydroxide that sequesters carbon dioxide and passes methane gas. There was an increase of 70% in the yield when working with swine manure, with 4% glycerin at a temperature of 45° C.

Keywords: biogas, biodiesel, glycerin, anaerobic co-digestion, experimental design, substrate, co-substrate, biodigester.



INDICE DE CONTENIDO

Contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
INDICE DE CONTENIDO	4
INDICE DE TABLAS	6
INDICE DE FIGURAS	7
CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	8
CLÁUSULAS DE PROPIEDAD INTELECTUAL.....	9
AGRADECIMIENTO	10
DEDICATORIA.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
CAPITULO 1	14
REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	14
MARCO TEORICO	16
1 BIOCOMBUSTIBLES.....	16
1.1 BIODIESEL.....	16
1.1.1 Materias Primas.....	17
1.1.2 Reacciones Químicas en la producción de Biodiesel.....	18
1.1.3 Glicerina como subproducto	20
1.2 BIOGÁS.....	21
1.2.1 Usos.....	22
1.2.2 Materia Prima.....	23
1.2.3 Proceso de Producción de Biogás. Etapas y Reacciones	28
1.3 BIODIGESTORES.....	36
1.3.1 Tipos de Biodigestores	36
CAPITULO II.....	40
MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
2 Descripción del Proceso	40



2.1	PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PARA OBTENCIÓN DE GLICERINA.....	40
2.1.1	Equipos y reactivos para la producción de biodiesel	40
2.1.2	Proceso para la producción de biodiesel	42
2.1.3	Procedimiento para la producción de biodiesel.....	42
2.1.4	Resultados Obtenidos de mililitros de glicerina.....	43
2.2	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	44
2.2.1	Justificación de Variables	44
2.2.2	Construcción de la matriz de un diseño factorial completo 2^3	45
2.2.3	Prueba de selección de variables	46
2.3	PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	48
2.3.1	Equipos y reactivos para la producción de biogás	48
2.3.2	Proceso para la producción de biogás	49
2.3.3	Procedimiento para la producción de biogás.....	50
2.3.4	Determinación de Resultados con la Técnica AME	55
CAPITULO 3	58
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
3	CANTIDAD DE METANO.....	58
3.1	RENDIMIENTO DE BIOGÁS	60
3.2	DEFINICIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO	62
3.2.1	Interpretación de coeficientes:	62
CAPITULO 4	64
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
4.1	CONCLUSIONES.....	64
4.2	RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXOS	72



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Residuos orgánicos de diversos orígenes.....	24
Tabla 2. Rendimiento de Metano	25
Tabla 3. Clasificación de sustratos.....	26
Tabla 4. Necesidades de las bacterias implicadas en el proceso de producción de biogás	30
Tabla 5. Rangos de niveles de nutrientes en diferentes residuos pecuarios	34
Tabla 6. Valores promedios aproximados de la relación C/N en excretas animales....	35
Tabla 7. Equipos e Instrumentos.....	41
Tabla 8. Reactivos	41
Tabla 9. Factores y su dominio experimenta.....	45
Tabla 10. Matriz de experimentos para el diseño factoriales completos 2 ³	46
Tabla 11. Plan de Experimentación	46
Tabla 12. Matriz de los efectos	47
Tabla 13. Cálculo de los efectos	47
Tabla 14. Equipos e instrumentos.....	49
Tabla 15. Reactivos	49
Tabla 16. Cantidades determinadas para la experimentación.....	52
Tabla 17. Control de pH en los experimentos	53
Tabla 18. Cantidad de Biogás en muestras testigo 1	58
Tabla 19. Cantidad de Biogás en experimentación 1	59
Tabla 20. Cantidad de biogás en muestras testigo 2.....	59
Tabla 21. Cantidad de Biogás en experimentación 2	59
Tabla 22. Cantidad de biogás en muestras testigo 3.....	60
Tabla 23. Cantidad de biogás en experimentación 3.....	60
Tabla 24. % de Rendimiento de Biogás	61
Tabla 25. Coeficientes de detección	62
Tabla 26. Variables que rigen el proceso	63
Tabla 27. Resultados de %Humedad.....	72
Tabla 28. Matriz para cálculo de coeficientes.....	73



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de transesterificación del aceite vegetal. (Fernandez, 2010).....	20
Figura 2. Diagrama de equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. (IDAE, 2007).....	22
Figura 3. Esquema de las etapas de la Fermentación. (Fuertes, 2012).....	32
Figura 4. Esquema de un biodigestor continuo. (Morales, Morales, & Holguín, 2016)	37
Figura 5. Esquema de un biodigestor continuo tipo tubular. (Morales, Morales, & Holguín, 2016).....	37
Figura 6. Esquema de un biodigestor discontinuo. (Morales, Morales, & Holguín, 2016)	38
Figura 7. Esquema de un biodigestor discontinuo cúpula fija. (Morales, Morales, & Holguín, 2016).....	38
Figura 8. Esquema de un biodigestor de dos etapas. (Morales, Morales, & Holguín, 2016).....	39
Figura 9. Esquema del Proceso General para la producción de biodiesel. (Bulla, 2014)	42
Figura 10. Esquema del Proceso de obtención de glicerina	43
Figura 11. Esquema del Proceso General para la producción de biodiesel. (Bulla, 2014).....	50
Figura 12. Adaptación para biodigestores	51
Figura 13. Coordenadas del lugar de recolección de la muestra	51
Figura 14. Preparación de los experimentos.....	53
Figura 15. Montaje de los biodigestores	54
Figura 16. Formación de costras previo a la agitación.....	54
Figura 17. Preparación para la técnica AME.....	56
Figura 18. Monitoreo de la producción de biogás	56
Figura 19. Quema de biogás	57



CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Ana Belén Escobar Cobos en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS PECUARIOS, EMPLEANDO LA GLICERINA COMO SUBPRODUCTO DE LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de Enero de 2018

Ana Belén Escobar Cobos

C.I: 0104765888



CLÁUSULAS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Cláusula de Propiedad Intelectual

Ana Belén Escobar Cobos, autora del trabajo de titulación "OPTIMIZAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS PECUARIOS, EMPLEANDO LA GLICERINA COMO SUBPRODUCTO DE LA OBTENCIÓN DE BODIESEL", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 27 de Enero de 2018

Ana Belén Escobar Cobos

C.I: 0104765888



AGRADECIMIENTO

Este trabajo de titulación, elaborado en la Universidad de Cuenca, es un esfuerzo conjunto de diferentes personas quienes estuvieron a mi lado apoyándome, escuchándome y guiándome en todo este camino. Por lo que primero agradezco a Dios por sus bendiciones, por darme la maravillosa vida que tengo y por poner en mi camino a las mejores personas.

A mi director de tesis Ing. Juan José Vázquez mi más sincero agradecimiento, ya que con su paciencia ha sabido comprender mis fallas y me ha apoyado en todo este proceso, ha guiado mis decisiones, procurando que sean las mejores para culminar de la mejor manera este proyecto. Quien con su experiencia, amistad y valores me ha inspirado para seguir adelante.

A la Ingeniera Alexandra Guanuchi, quien más que una docente, es una gran amiga, que siempre ha sabido darme un momento de su tiempo, sin importar lo ocupada que se encuentre.

A mi familia ya que cada uno de ellos contribuyeron para alcanzar este paso tan grande en mi vida, en especial a mis padres, Alfredo Escobar, Enrique Cobos, Patricia Cobos y Azucena Cali, quienes son mi más grande fuente de inspiración, alegría y sobre todo ejemplo a seguir, quienes con su cariño supieron entender mis ausencias, mis malos momentos y ayudarme a salir adelante.

Un agradecimiento enorme para la mejor persona que pude conocer, Christian Chuya quien con su amor y paciencia estuvo a mi lado ayudándome en todo momento sin importar nada. De igual manera a mi gran amiga Isabel Aguilar que me apoyó en innumerables ocasiones, dejando a un lado sus necesidades y dándose tiempo para estar cuando la necesité.

Todo esto no hubiera sido posible sin su presencia en mi vida, su paciencia y su apoyo incondicional, gracias infinitas a cada uno de ustedes.



DEDICATORIA

Dedico esta tesis mis padres quienes de una u otra manera estuvieron apoyándome en todo momento, de igual manera a mis familiares y amigos, sin los cuales esto no sería posible.



INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial, pues la capacidad para extraer y utilizar estos combustibles ha sido el catalizador para el desarrollo tecnológico e industrial, que ha dado lugar a un avance socioeconómico sin precedentes en el mundo.

Debido a esta gran dependencia al uso de los combustibles fósiles, los cuales son contaminantes medioambientales, por ejemplo, la combustión del petróleo genera cantidades perjudiciales de dióxido de carbono (CO_2) debido a que necesita pasar por una serie de procesos químicos para ser transformado en diferentes productos comercializables.

Estos combustibles son fuentes limitadas, ya que, el aumento de la población mundial y la cultura de consumo en la que se encuentra envuelta la sociedad provoca su agotamiento, es ahí donde el estudio de los biocombustibles toma importancia, pues permiten que la vegetación del planeta, pueda transformarse y regenerarse de manera natural, impidiendo así el aumento de la concentración de CO_2 existente.

Sin embargo, la producción de biocombustibles generalmente no es óptima pues, usan materiales complejos, reacciones largas, procesos muy costosos y demorados, sus rendimientos son bajos, y los biocombustibles que se obtienen no alcanzan los rendimientos energéticos que proporcionan los combustibles fósiles. Por otra parte también generan residuos contaminantes, claro está que en menor proporción, de forma que existen subproductos para los cuales en muchos de los casos, es complejo darles uso sin que conlleve un gran costo. (Navarro, 2016)

La glicerina como subproducto de la producción de biodiesel, es uno de los residuos considerados como un problema debido a que no tiene una utilidad 100% aprovechable, pues se estima que más de 2 millones de toneladas llegan al mercado cada año, y dado el crecimiento acelerado de este biocombustible y la marcada tendencia a su incremento, la búsqueda de nuevas aplicaciones para la glicerina cruda han generado interés de la comunidad científica. (Betancourt, 2016)

Por lo que según (Santibáñez, Varnero, & Bustamante, 2011) debido al alto contenido de carbono de la glicerina, el cual es fácilmente aprovechable por los microorganismos generadores de biogás, este aumenta su rendimiento de un 50 a un 200%, y genera una disminución en los costos del proceso. En efecto la presente investigación



propone, encontrar las concentraciones adecuadas de glicerina para la optimización de la producción de biogás.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimizar la producción de biogás a partir de residuos pecuarios, empleando la glicerina como subproducto de la obtención de biodiesel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer el proceso de obtención de biogás.
- Establecer características de producción requeridas para el diseño de los biodigestores.
- Determinar mediante diseño experimental las concentraciones óptimas para la utilización de la glicerina en el proceso
- Determinar el impacto del uso de la glicerina en el rendimiento de la producción de biogás



CAPITULO 1

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En el contexto del creciente interés por las energías renovables, la producción de biocombustibles a partir de residuos agrícolas se propone como una de las posibles opciones para sustituir los recursos energéticos derivados del petróleo, siendo el biogás uno de los llamados biocombustibles de tercera generación, ya que procede de la biomasa no apta para el consumo humano o de desechos.

Las plantas de biogás agroindustrial, además de generar energía renovable, permiten procesar y valorizar gran variedad de materia orgánica derivada de la industria agroalimentaria, lo que abarata costes de gestión y de tratamiento de residuos. Como ejemplos, en una planta de biogás se pueden procesar: restos de la fabricación de productos lácteos, desechos ganaderos, residuos orgánicos de animales de granja y pulpa y pieles de cítricos, entre otros.

Sin embargo, aunque España genera una gran cantidad de residuos agroalimentarios debido a que es el país de la Unión Europea con mayor superficie destinada a la agricultura, y entre los primeros en cuanto a producción ganadera y fabricación alimentaria, se encuentra a la cola en países productores de biogás agroindustrial. En los últimos tres años el número de plantas de biogás ha crecido de 5 a 22, pero aproximadamente el 90% de biogás producido proviene de vertederos y depuradoras, por lo que en materia de implantación de plantas de biogás agroindustrial todavía queda mucho por hacer.

Por lo que (Navarro, 2016) propuso trabajar con 8 biodigestores de 1L de capacidad adaptados a las condiciones experimentales de laboratorio, siendo estas de 35,1°C y con un control riguroso de pH de entre 7,5 y 8,6, añadiendo hidróxido de sodio para su regulación. Para lo cual se utilizó residuos de cascara de tomate, plátano, jatropha y glicerina subproducto de la producción de biodiesel, tomando 21 días para su biodigestión total, en donde se obtuvo un aumento del 32% al trabajar con plátano-tomate-glicerina, y un incremento del 80% con plátano-jatropha-glicerina, pues al ser la jatropha rica en nitrógeno, la glicerina actuó como un excelente co-sustrato.



(Indiveri, et al., 2011) Quienes trabajaron con orujo de uva que es la parte sólida que no tiene aprovechamiento en la previa elaboración del vino, y un inóculo que en este caso fue un líquido ruminal, estabilizado en laboratorio a 36° y agregado carbonato de calcio para un pH de 7. Se utilizó 21 bioreactores anaeróbicos cargados con inóculo, orujo-inóculo, de inóculo-glicerina en porcentajes de 5, 10, 15 y 20. Observando que existe un incremento del 45% al trabajar con el inóculo y el 15% de glicerina, caso contrario al trabajar con el orujo y el inóculo que solo produce un 18% en el aumento, debido a la menor presencia de sólidos en el inóculo. Este investigador concluyó que a concentraciones de 15 al 20% de glicerina se ve un incremento mayor que al trabajar con porcentajes menores.

(Augusto, et al., 2015) Quiénes plantearon trabajar con estiércol bovino únicamente lechero, en consecuencia los animales eran alimentados con ensilaje de maíz dos veces al día, y pasto el resto del tiempo, un inóculo que consistió en yodo, derivado de las aguas residuales, con aproximadamente un 4% total sólidos y glicerina subproducto de la producción de biodiesel a partir del aceite de soja, en porcentajes del 0, 2, 4, y 6%. Los biodigestores a escala de laboratorio se construyeron a partir de tubos de PVC sellados en ambos extremos con un volumen de 5 litros para cada biodigestor a una temperatura de 30°C. Dando un aumento del 68% al trabajar con glicerina al 4% y una disminución de 41% al trabajar con el 6% de glicerina.

(Amon et al., 2006) Utilizaron digestores discontinuos y mostraron que la adición de glicerina al estiércol de cerdo en cantidades variables dio como resultado un aumento del 74% en la producción de metano, y sugirieron que la adición de glicerol no debería exceder el 6% para garantizar un funcionamiento estable, pues se observó que al 15% se tuvieron concentraciones muy altas de ácido acético. Se cree que esto se debió a la carga de la muestra con exceso de glicerol y a un aumento rápido del pH, que los metanógenos tardaron mucho en adaptarse y superar, lo que dificultó la producción de metano.

(Mladenovska et al., 2003) Encontraron que la mezcla de estiércol bovino con 2% de glicerol aumentó significativamente los rendimientos específicos de metano de 224 a 382 CH₄), lo que reporta un incremento del 70% y posteriormente una mayor eliminación de materia orgánica del 37 a 51%, en comparación con un digestor sin la adición de glicerol.



(Álvarez et al., 2010) quienes realizaron un experimento a escala de laboratorio para maximizar la producción de metano mediante la co-digestión anaeróbica de tres residuos agroindustriales: glicerol crudo, estiércol de cerdo y desechos de atún. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando reactores discontinuos de 0,5 litros a 35 °C. Se introdujeron mezclas de diferentes sustratos en los reactores, utilizando un método de optimización de programación lineal para encontrar las proporciones más adecuadas de co-sustratos. En los cuales las mezclas fueron de 84% de estiércol de cerdo, 5% de desperdicio de pescado y 11% y 88% de estiércol de cerdos, 4% de desechos de pescado y 8% de desechos de biodiesel, alcanzando un incremento hasta del 95% al trabajar con la segunda mezcla.

MARCO TEORICO

1 BIOCOMBUSTIBLES

Un biocombustible es aquel carburante de origen biológico, hecho por el hombre a partir de materia prima que no se ha fosilizado, descartando de esta manera el petróleo, el carbón mineral, y el gas natural, ya que su procedencia también es biológica, sin embargo estos han sido fosilizados hace cientos de miles de años. (Camps & Martín, 2008)

Los biocombustibles resultan de la descomposición de la biomasa, la misma que se origina por todos los seres vivos presentes en el planeta, siendo esta una fuente de energía renovable, de la cual resultan diferentes productos que pueden sustituir total o parcialmente a los derivados del petróleo.

Los principales biocombustibles obtenidos a partir de los grupos de biomasa son biodiesel, bioetanol y biogás. Sin embargo para utilidad de esta investigación nos enfocaremos en las características del biodiesel y biogás ya que dentro de las materias primas utilizaremos glicerina, subproducto de biodiesel. (Navarro, 2016)

1.1 BODIESEL

Es un combustible líquido, el cual se obtiene a partir de aceites vegetales como las semillas de colza, girasol, nueces, palma africana, jatropha, de aceites de fritura



(usados) o de grasas animales y de un alcohol de peso molecular bajo como el metanol o etanol, todo esto en presencia de un catalizador para originar ésteres monoalquílicos y glicerina como subproducto. Mediante procesos de esterificación y transesterificación. (Bahamonde, 2014)

Una definición técnica es la dada por la American Society for Testing and Material Standard (ASTM) en donde se define al biodiesel como la mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables, tales como aceites vegetales o grasas de animales. (Hernandez J. , 2012)

Debido a que las propiedades del biodiesel son análogas a las del gasóleo en cuanto a densidad, número de cetano, y que conjuntamente presenta un punto de inflamación superior, pueden estos dos mezclarse para su uso en motores, e inclusive el biodiesel puede sustituirlo totalmente si se adaptan estos eficazmente. (Fernandez, 2010)

1.1.1 Materias Primas

Las materias primas utilizadas en la producción del biodiesel son diversas, de acuerdo a esta gran existencia de fuentes estas tienen gran accesibilidad y en muchos de los casos son económicos, las cuales según su origen se agrupan en: aceites convencionales (palma), aceites vegetales alternativos (*Jatropha curcas* (piñón)), aceites vegetales modificados genéticamente y aceites de frituras usadas. (Fernandez, 2010)

Cabe recalcar que en el Ecuador la principal materia prima para la producción de biodiesel es el aceite de palma, ya que según un censo de la (Fundación de fomento de exportaciones de aceite de palma y sus derivados de origen Nacional (FEDAPAL), 2017) el Ecuador en este año produjo 593.000 Toneladas métricas (Tm) de palma, en donde solo 218.000Tm fueron utilizadas y dejando un excedente de 350.000Tm. Por lo que podemos notar que más de la mitad del aceite de palma no es utilizado en la producción del biodiesel debido a la poca demanda que existe en el país.

Esta oleaginosa fue introducida en el Ecuador en el año de 1953, sin embargo su expansión comercial se inició a partir de 1965, año en el que estaban sembradas aproximadamente 1.300 hectáreas, ubicadas sobre todo en la zona de Santo Domingo



de los Colorados, el progreso de esta oleaginosa ha sido acelerado así lo explica el Sistema de Investigación sobre la Problemática Agraria en el Ecuador (SIPAE) quienes atribuyen esto, a procesos favorables como: un mercado interno en expansión, precios relativos superiores y políticas estatales.

Sin embargo pese a que la palma es la principal fuente de materia prima para producción de biodiesel en el Ecuador, en los últimos años se han implantado nuestros proyectos de biocombustibles con aportes del sector público, los cuales son:

- ✓ Proyecto Piñón para Galápagos.
- ✓ Plan piloto Ecopaís.
- ✓ Proyecto de la Universidad Católica del Ecuador para generación de biodiesel.
- ✓ Proyecto Piloto del MAGAP y MICOPEC, para aprovechar los excedentes de la producción de aceite de palma en el Ecuador. (Bahamonde, 2014)

En el caso de *Jatropha curcas* (piñón en Ecuador), este es un cultivo que hasta el 2007 se había desarrollado de forma silvestre en diferentes zonas, sin embargo en el año 2008 el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) viene promoviendo la producción de aceite puro de piñón, con lo cual dicho proyecto prevé contribuir a reducir el consumo de diésel para la generación de electricidad en las islas Galápagos. (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017)

Por lo que al demostrar que hay una gran cantidad de materias primas, la producción de biodiesel no está atada a la disponibilidad de las mismas, sino más bien a la existencia de una suficiente demanda en su producción, con lo cual se podría favorecer otras políticas que beneficien al agrícola. (Fernandez, 2010)

1.1.2 Reacciones Químicas en la producción de Biodiesel

El biodiesel se obtiene a partir de procesos industriales de esterificación de los ácidos grasos y transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales. Sin embargo para interés de esta investigación nos centraremos en el proceso de transesterificación, ya que del cual se obtiene glicerina como subproducto.

Los catalizadores más utilizados en estas reacciones son los homogéneos básicos, debido a que actúan mucho más rápido y además permiten operar en condiciones

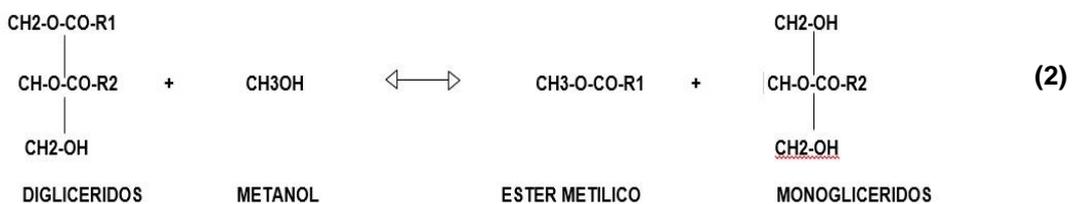


moderadas. Pues en las reacciones de transesterificación al utilizar un catalizador ácido se requiere condiciones de temperaturas elevadas y tiempos de reacción largos. (Hernandez J. , 2012)

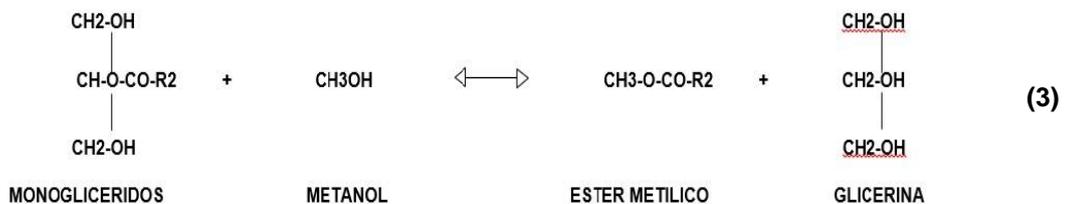
A continuación se presentan las diferentes reacciones que tienen lugar en la transesterificación, la cual químicamente radica en tres reacciones reversibles consecutivas, en donde el triglicérido es transformado consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina, liberando un mol de éster metílico en cada reacción. (Fernandez, 2010)



En la ecuación número 1 actúa un ácido graso con un alcohol que en este caso es metanol y en presencia de un catalizador, obteniendo como producto principal un mol de éster metílico y como subproducto un diglicérido.



Al ser reacciones consecutivas el subproducto de la ecuación número 1 que es un di glicérido reacciona con el metanol para dar un mol de éster metílico y un mono glicérido.



Y por último se da la etapa final de la reacción en donde el mono glicérido reacciona nuevamente con el metanol para obtener otro mol de éster metílico y como subproducto final la producción de glicerina.

Estas reacciones tienen lugar en un reactor, pasando por diferentes fases (Figura 1). La primera se da en la zona de reacción, en la cual puede darse subproductos como la formación de jabones, siendo residuos indeseables que contaminan el biodiesel, así como la disminución de la conversión y del rendimiento.

La segunda fase se define como la zona de purificación, en esta etapa se da la separación de la glicerina y el biodiesel, así como la eliminación de exceso de metanol, de residuos de catalizador y el jabón que ha sido generado como subproducto, usualmente este proceso se hace con agua. (Fernández, et al., 2006)

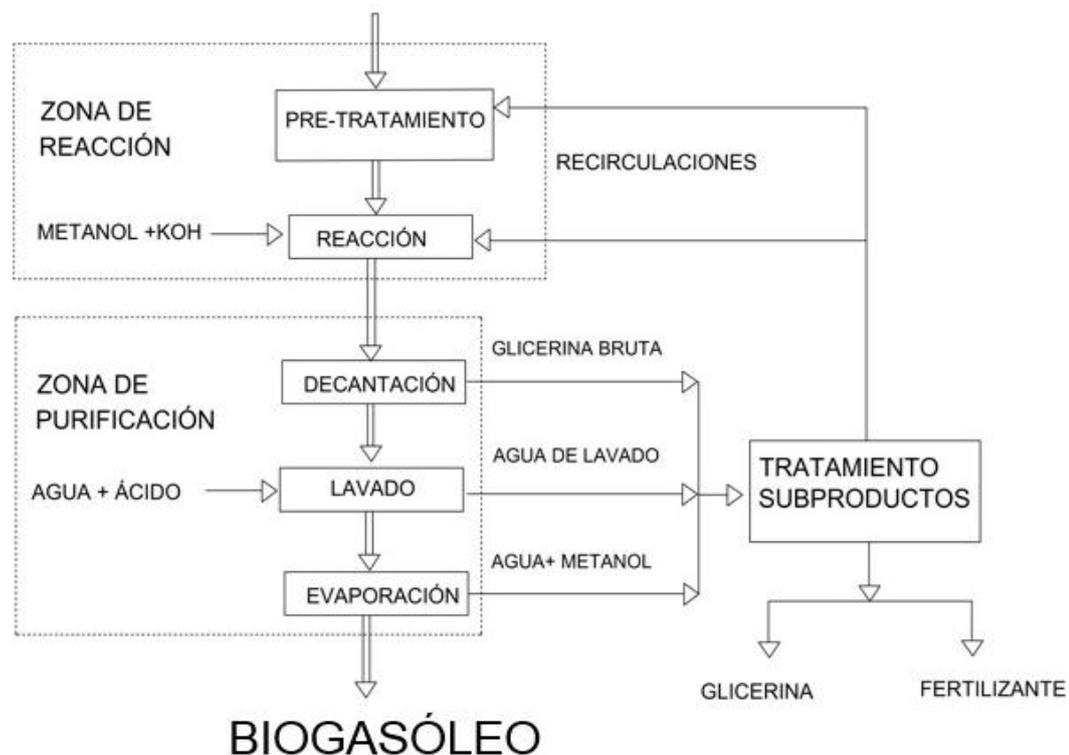


Figura 1. Esquema del proceso de transesterificación del aceite vegetal. (Fernandez, 2010)

1.1.3 Glicerina como subproducto

El glicerol está presente en todos los aceites y grasas animales y vegetales de la forma combinada, es decir, ligadas a los ácidos grasos como el ácido esteárico, oleico, palmítico y ácido láurico para formar una molécula de triglicéridos. Todo el glicerol



producido en el mundo hasta 1949, provenía de la industria del jabón. En la actualidad, proviene de los glicéridos (grasas y aceites naturales), el resto de la producción de glicerina sintética (subproducto del propileno), y de la producción de biodiesel. (Bautista, 2011)

Como principal subproducto del proceso de producción de biodiesel se tiene la glicerina, la cual se forma en una proporción de aproximadamente el 10% en peso. La glicerina cruda así formada posee muy poco valor económico debido a que contiene alta concentración de impurezas.

De acuerdo al grado de pureza comercial requerida se realizan los procesos de refinado a la glicerina cruda. Por ejemplo para el mercado cosmético, en la industria alimentaria y farmacéutico debe presentar un elevado grado de pureza (superior al 99,7%), por lo que se considera a la glicerina como un subproducto poco rentable.

Debido a que durante la última década, la producción de biodiesel ha ido en aumento de forma exponencial, dando lugar a un excedente de glicerina que en un futuro cercano los usos tradicionales ya no podrán asimilar, por lo que se debe investigar nuevas alternativas en las que esta actúe como una buena fuente de materia prima sin incrementar en costos de refinado. (Izquierdo, Galán, Jutglar, & Villarrubia, 2012)

1.2 BIOGÁS

El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, todo esto en ausencia de oxígeno. El producto resultante es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre un 40% a un 70% y dióxido de carbono (CO_2), sin embargo contiene también pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). (Erenovable, 2015)

Debido a que presenta alto contenido de metano tiene un poder calorífico muy alto, por ejemplo un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/Nm^3 ($6,4 \text{ kWh/Nm}^3$), razón por la cual se lo considera como un combustible ideal, salvo por su contenido en H_2S , por lo que de acuerdo a sus diferentes composiciones de metano lo podemos comparar con las fuentes de energía

más utilizadas como se muestra a continuación en la Figura 2: (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE, 2007)

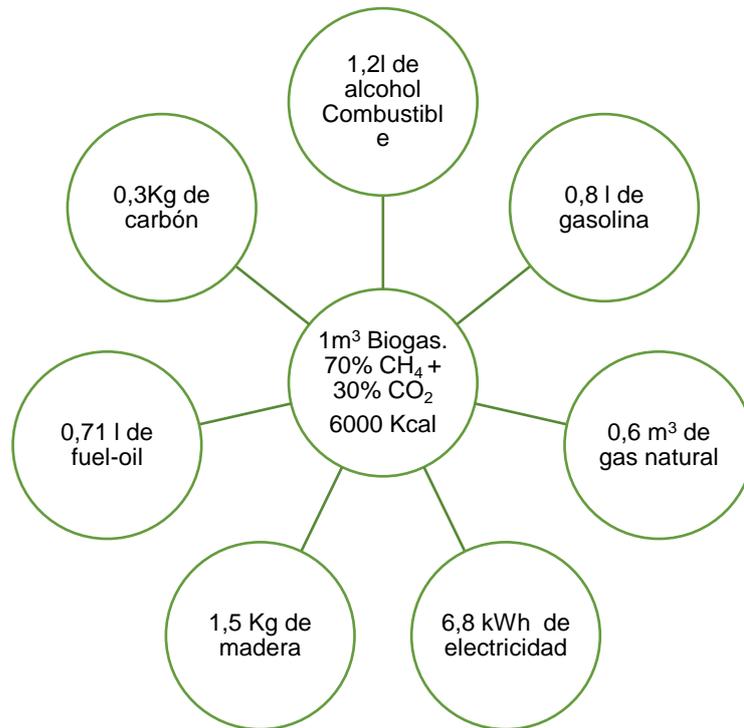


Figura 2.Diagrama de equivalencias de biogás con otras fuentes de energía. (IDAE, 2007)

En este diagrama se observa la naturaleza competitiva del biogás respecto de los demás tipos de energías no renovables, destacando que al ser de origen natural es mucho más beneficioso para el medio ambiente y al proceder de residuos es mucho más rentable.

1.2.1 Usos

El biogás es un recurso poco aprovechado que poco a poco se va valorando, sobre todo en los lugares donde requieren de energía barata, pudiéndolo utilizar para cubrir muchas necesidades como son:

- Cocinar
- Para calefacciones de ambientes
- Para hacer funcionar generadores eléctricos.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- Combustible de automoción. (IDAE, 2007)



1.2.2 Materia Prima

Existe una gran variedad de materias primas para la producción de biogás, las cuales son accesibles ya que se las puede obtener de diferentes maneras. Sin embargo en la actualidad se prefiere co-digestores para mejorar el rendimiento del biogás, mediante la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. Aprovechando la sinergia de las mezclas y supliendo las carencias de cada uno de los sustratos por separado. (Montes, 2008)

1.2.2.1 Residuos.

Se entiende por residuo, a todo material que ha sido destinado al abandono por su productor o poseedor, los cuales son clasificados de diversas maneras. Estructuralmente conservan ciertas características desde su origen hasta su disposición final. (Luna, 2014)

1.2.2.1.1 Clasificación de Residuos.

Debido a la gran variedad de materias primas que se pueden utilizar, se ha visto ventajosa clasificarlas en dos tipos, de acuerdo al origen, en el cual se detallará sus diferentes procedencias, y de acuerdo al tipo de sustrato.

- **Origen del Residuo**

En una planta de producción de biogás se pueden utilizar diferentes materias primas como residuos orgánicos de origen vegetal, animal, humano y otros que se muestran (Tabla 1). Las sustancias muy fibrosas tales como los desechos de cosechas, resultan inadecuadas para el uso en biodigestores, debido a que no permiten una degradación correcta de la materia orgánica, lo que provoca una alteración del pH e incrementa la formación de espuma, en efecto se da una escasa producción de biogás. (Delgado, 2000)



Tabla 1. Residuos orgánicos de diversos orígenes

Origen del Residuo	Clasificación
Residuos de origen animal	Estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas

Fuente (Varnero, 2011)

Siendo los más utilizados los detallados a continuación, pues han sido los que generan mejores resultados.

- Ganado Vacuno

El ganado vacuno es aquel referente a los mamíferos conocidos como vacas, su fuente de alimento principal es el pasto, el cual se obtiene de los potreros. También se les da forraje, mezclado con melaza, un subproducto del procesamiento de la caña de azúcar. Para tener una relación de los rendimientos de biogás (Tabla 2). (Luna, 2014)

Las poblaciones de bacterias que viven en el estómago de la vaca son microorganismos que digieren la celulosa, el almidón y la hemicelulosa, también fermentadores de azúcar y otros que metabolizan los ácidos grasos, las bacterias metanógenas, bacterias proteolíticas y bacterias lipolíticas. Entre estas bacterias están las siguientes: *Clostridium lochheadii*, *Clostridium polysaccharolyticum*, *Streptococcus bovis*, *Lactobacillus ruminis*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanomicrobium mobile*. Siendo las dos últimas las responsables de la formación de CH₄. (S.E, 2013)



- Ganado Porcino

Este es un animal doméstico usado en la alimentación, está adaptado a la producción de carne ya que crecen y maduran con rapidez. Su estómago presenta bacterias como: *Streptococcus*, *lactobacillus*, *eubacterium*, *fusobacterium*, *bacteroides*, *bifidobacterium*, *clostridium*, *butirovibrio* y *escherichia*, responsables de la producción de metano. (García, 2005)

Tanto los valores de producción como de rendimiento de biogás de los estiércoles presentan diferencias entre autores, pues esto depende de factores que actúan en la producción y en el manejo de los animales, en consecuencia a esto la tabla 2 solo se debe tomar como orientativa. (Hilbert, 2011)

Tabla 2. Rendimiento de Metano

Especie	Peso Vivo (kg)	kg Estiércol/día	% CH₄
Cerdos	50	4,5 – 6	65 – 70
Vacas	400	25 - 40	65

Fuente (Hilbert, 2011)

Kg: Kilogramo

- **Tipo de Sustrato**

De acuerdo al tipo de sustrato estos se dividen en 4 clases, tomando en cuenta sus diferentes características (Tabla 3), las cuales proporcionan una pauta para seleccionar el biorreactor que mejor se ajuste a las condiciones de este trabajo de investigación.

- **Los sustratos de clase 1:** Estos pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch o por lotes.
- **Los sustratos de la clase 2:** Por presentar una dilución mayor y en consecuencia una demanda química de oxígeno (DQO) menor, los de este tipo son degradados de manera eficiente en digestores de mezcla completa de operación continua.



- o **Los sustratos de clase 3:** Deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio.
- o **Los sustratos de clase 4:** Debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia. (Varnero, 2011)

Tabla 3. Clasificación de sustratos

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características cuantitativas
Sólido	1	Basura Doméstica	> 20 % ST
		Estiércol Sólido	40 – 70 % Fracción Orgánica
		Restos de cosechas	
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces Animales	100 – 150 g/l DQO 5% - 10% ST 4% - 8% SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces Animales de cría Aguas residuales de matadero	3 – 17 g/l DQO 1 – 2 g/l SS
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias Aguas negras	5 – 18 g/l DQO 4 – 500 g/l DQO

Fuente (Varnero, 2011)

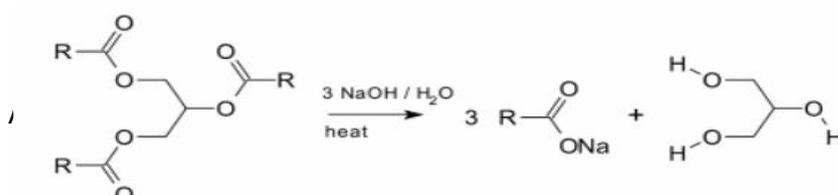
ST: Sólidos Totales

SV: Sólidos Volátiles

SS: Sólidos Suspendidos

1.2.2.2 Glicerina como materia prima.

También conocida como “glicerol”, nombrada químicamente 1,2,3 propanotriol, antiguamente se producía a partir de la saponificación de las grasas para obtener jabón (Ecuación 4), aunque hoy en día gran parte de la misma se forma como subproducto en la elaboración de biodiesel (Ecuación 5) (Indiveri, et al., 2011)





(4)



El glicerol crudo generado por transesterificación en la producción de biodiesel, contiene aproximadamente 50 a 60% de glicerol, 12 a 16% de álcalis, especialmente en forma de jabones e hidróxidos alcalinos, 15 a 18% de ésteres metílicos, 8 a 12% de metanol, y 2 a 3% de agua. Además del metanol y los jabones, el glicerol en bruto también presenta una variedad de elementos que se originan del aceite primario, como potasio K (0 a 217 ppm), fósforo P (12 a 37 ppm), Azufre S (14 a 128 ppm), Sodio Na (1,06 a 1,40), Carbono C (24 a 37%), Nitrógeno N (0,04 a 0,12%) y proteína (0,05 a 0,44%).

De acuerdo a la literatura, la glicerina como subproducto de la producción de biodiesel por su alto contenido de carbono, eleva la relación C:N en la mezcla, impidiendo la inhibición del proceso por el exceso de N, aumentando así la producción de digestores de metano en un 50 a 200%.

Las ventajas de la co-digestión anaeróbica utilizando glicerina cruda son que este producto es fácilmente digerible y fácil de almacenar durante largos períodos. (Castrillón, Fernandez, Ormaechea, & Marañón , 2013). Esta co-digestión anaeróbica de glicerol y una variedad de biomásas residuales resultan ser una buena solución integrada para el manejo de estos desechos y al mismo tiempo generar una fuente de bioenergía de una manera ecológica. (Santibáñez, Varnero, & Bustamante, 2011)

1.2.2.3 Agua.



La misma puede ser agua de lluvia o tomada de un riachuelo, río, laguna o pozo. Sin embargo, no se recomienda el uso de agua clorada debido a que separa las bacterias metanogénicas, que son las que fermentan la materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno (anaerobiosis). (Bionero, 2010)

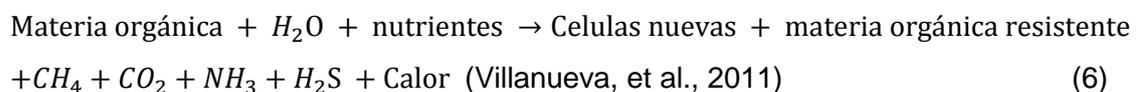
1.2.3 Proceso de Producción de Biogás. Etapas y Reacciones

Teniendo en cuenta que la producción de biogás se puede dar en presencia y en ausencia del oxígeno se dividen en dos procesos de biodigestión, la digestión aerobia en donde solo un 50% de la energía es transformada en metano y la digestión anaerobia en donde más de un 90% de la energía que se obtiene por oxidación directa se transforma en metano. Por lo que para interés de este proyecto al tomar en cuenta esta relación conviene solo detallar características de la digestión anaerobia. (Varnero, 2011)

1.2.3.1 Proceso de Biodigestión anaeróbica.

La biodigestión anaeróbica es un proceso biológico mediante el cual, en ausencia de oxígeno y en presencia de agua, la materia orgánica es transformada, adquiriendo como subproducto una mezcla de gases llamado biogás y bioabono. Este proceso se puede surgir de forma natural en lugares como: pantanos, campos de arroz y de forma artificial se origina en un dispositivo llamado biodigestor. (Villanueva, Nájera, Gómez, Hernández, & Velasco, 2011)

En este proceso los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y junto con las bacterias no metanogénicas componen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que sale del sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes (Ecuación 6), estos pueden ser: anhídrido carbónico (CO_2), hidrógeno (H_2) y ácido sulfhídrico, los cuales pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo. (Varnero, 2011)





- **Etapas de la Biodigestion Anaerobia.**

Debido a la complejidad del proceso, y por el número de reacciones que se desarrollan, las cuales van sucediendo en forma simultánea. Los diferentes estudios han dividido este proceso de digestión anaerobia en cuatro diferentes etapas condensadas en la figura número 3, las cuales se explicaran con más detalle a continuación:

- Etapa I: Hidrólisis

En esta etapa las moléculas complejas son degradados a moléculas simples, por ejemplo las proteínas a aminoácidos, y los polisacáridos a monosacáridos, esto se da por la acción de bacterias hidrolíticas las cuales segregan encimas extracelulares como la proteasa, amilasa y la lipasa, para la transformación de dichos compuestos para así volverlos solubles. (Varnero, 2011); (Gutiérrez, et al., 2012)

Dentro de los géneros de bacterias con capacidad hidrolítica en procesos de digestión anaerobia comúnmente son: *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Lactobacillus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Eubacterium*, *Propionibacterium* e *Echerichia*. (Siqueira, 2012)

- Etapa II: Acidogénesis

En esta etapa los productos obtenidos en la fase de hidrólisis son convertidos a ácidos grasos de bajo peso molecular como el ácido acético, fórmico, propiónico e incluso en dióxido de carbono, la fermentación de los azúcares depende del microorganismo y de la ruta metabólica que ocurre. Los principales microorganismos asociados con la fermentación de la glucosa son de tipo *Clostridium*. (Gutiérrez, et al., 2012); (Siqueira, 2012)

- Etapa III: Acetogénesis

Las moléculas que provienen de la etapa de la acidogénesis son captadas por los microorganismos acetógenos para emplearlas en la producción de acetato, dióxido de carbono e hidrogeno. (Gutiérrez, et al., 2012), Los géneros conocidos de bacterias que actúan en esta etapa son: *Syntrophobacter* y *Syntrophomonas*. (Siqueira, 2012)



- Etapa IV: Metanogénesis

Las bacterias metanogénicas (*Methanobacterium*, *Methanococcus*) actúan sobre los productos de las etapas anteriores y completan el proceso de descomposición anaeróbica mediante la producción de metano, según se observa en la ecuación 5. (Varnero, 2011); (Gonzalez, 2013)

En esta etapa se pueden establecer dos grupos de microorganismos, en función de los sustratos que pueden transformar las bacterias, los cuales se muestran en la tabla 4: (Gutiérrez, et al., 2012)

Tabla 4. Necesidades de las bacterias implicadas en el proceso de producción de biogás

Parámetros	Bacterias Hidrolíticas y acidogénicas	Bacterias metanogénicas
Tiempo de Reproducción	De 3 horas a 6 días	6 – 14 días
Temperatura Óptima	30°C – a 65°C	37°C - 55°C
Valor pH	Mínimo 3,5; Máximo 7,8	Cerca de 7 - 8
Vitalidad	Grande: Resisten perturbaciones en la temperatura y el valor de pH	Muy sensible a variaciones de pH y temperatura
Sensibilidad aerobia	Trabajan también ante la introducción de oxígeno	Mueren en contacto con el oxígeno
Producción de biogás	Poca: 0 - 30%	Alta: > 50%

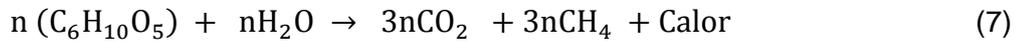
Fuente (Gutiérrez, et al., 2012)

Debido a las características presentadas en la tabla 3 se puede observar que la etapa crucial en la producción de biogás es la metanogénesis, ya que es durante la presencia de las bacterias metanogénicas, que se debe tener mucho cuidado con las variaciones de temperatura así como de pH, pues son las que producen mayor cantidad de metano. (Gutiérrez, et al., 2012)

- **Reacciones de la Biodigestión anaerobia.**

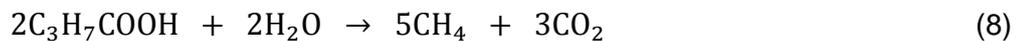


Debido a la escasa información y complejidad de la materia orgánica (Jara & Moscoso, 2003) han representado la etapa de la metalogénesis de la siguiente manera: En donde la reacción general es la ecuación 7, en donde la materia orgánica es la celulosa, actuando como el principal componente.

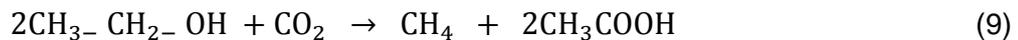


Y como reacciones individuales que se pueden incluir son las siguientes:

Rompimiento de ácido a metano:



Oxidación de etanol por el CO_2 para producir metano y ácido acético



Descomposición del ácido acético para producir metano y anhídrido carbónico



Reducción del dióxido de carbono con hidrogeno para producir metano



En términos biológicos una digestión exitosa depende del equilibrio entre las diferentes clases de bacterias, lo cual se obtiene con una alimentación abundante en líquidos, un adecuado pH, una temperatura óptima y teniendo una buena calidad de la materia prima. (Jara, et al., 2003)

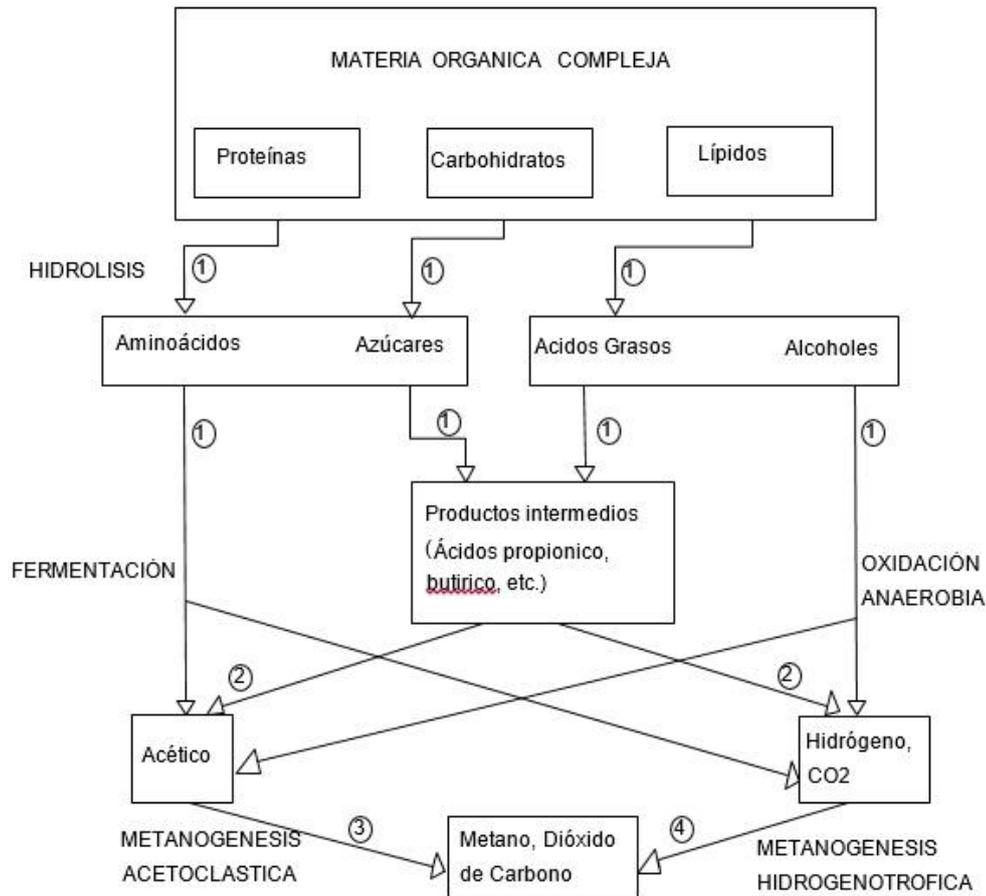


Figura 3. Esquema de las etapas de la Fermentación. (Fuentes, 2012)

En cada uno de los números marcados de la figura 3 se indica donde van actuando las diferentes bacterias. En el punto 1 las bacterias fermentativas, en el punto 2 bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno, en el punto 3 las Metanógenos Acetoclásticos y finalmente en el punto 4 los Metanógenos reductores de CO₂, para dar finalmente la producción de Biogás. (Fuentes, 2012)

- **Factores a considerar en el proceso de la biodigestión anaerobia.**

Para el correcto funcionamiento del proceso de degradación anaerobia, es necesario que las velocidades de transformación metabólica de los diferentes grupos bacterianos estén en equilibrio, ya que los productos finales de una etapa son consumidos en las siguientes etapas, dando lugar a una relación simbiótica que estabiliza el proceso. (Fuentes, 2012)

Debido a la extensa cantidad de pruebas con diferentes métodos y condiciones, no existe unanimidad entre los investigadores sobre las condiciones óptimas y los rangos

Autora: Ana Belén Escobar



de oscilación de las variables que afectan a la digestión anaerobia, a continuación de describen brevemente algunos de los parámetros que afectan al proceso de digestión. (Fuertes, 2012)

- Temperatura

De modo general existen tres rangos de temperaturas a los que se puede llevar a cabo la digestión anaerobia, los Psicrófilicos que se encuentran por debajo de los 25°C, los mesófilicos de 25°C a 45°C y los termófilicos de 45°C a 65°C. Debido a que las variaciones bruscas de temperatura dentro del digestor pueden provocar una desestabilización total del proceso, es indispensable un sistema adecuado de control de temperatura. (Villanueva, et al., 2011)

La temperatura está directamente relacionada con el tiempo que debe permanecer la biomasa en el biodigestor para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). A medida que esta aumenta disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa, considerando un rango de temperatura óptima desde 30 a los 55 °C. (Hilbert, 2011)

- pH

Durante la fase inicial ácida, que puede durar 2 semanas, el pH puede bajar a 6 o menos mientras que se produce una gran cantidad de CO₂, conforme avanza la digestión se produce menos CO₂ y más metano y el pH se eleva lentamente hasta llegar a un valor entre 7 y 8. (Magaña, et al., 2006)

Sin embargo para los sistemas anaerobios, el rango de pH en el que se considera que un proceso es estable está entre 6,6 y 7,6. Aunque puede conseguirse un proceso estable a valores mayores que oscilen entre 7 y 8,5 debido a los efectos buffer que producen compuestos como el bicarbonato, dióxido de carbono, Amonio y Amoníaco (HCO₃ – CO₂ – NH₄ – NH₃), respectivamente, pues el proceso en si tiene la capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada. (Fuertes, 2012); (Hilbert, 2011)



- Nutrientes

Este proceso se caracteriza por los bajos requerimientos de nutrientes, a pesar de ello, la biomasa para su desarrollo necesita del suministro de una serie de nutrientes minerales (nitrógeno, azufre, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, y riboflavina), además de una fuente de carbono y energía. (Fuentes, 2012)

Estos nutrientes minerales se encuentran en proporciones adecuadas en las sustancias orgánicas como los estiércoles y los lodos cloacales, en la cual se detalla una aproximación de la cantidad presente en las diferentes excretas, mismas que se encuentran en formas directamente asimilables por los microorganismos (Tabla 5). (Fuentes, 2012); (Varnero, 2011)

Tabla 5. Rangos de niveles de nutrientes en diferentes residuos pecuarios

Excretas	C(%)	N(%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O(%)	CaO(%)	MgO(%)
Bovino	17,4 – 40,6	0,3 – 2	0,1 – 1,5	0,10	0,35	0,13
Porcino	17,4 - 46	1,1 – 2,5	0,4 – 4,6	0,30	0,09	0,10
Caprino	35 - 50	1 – 2	0,2 – 1,5	2,30		
Equino	35 - 52	0,3 – 0,8	0,4 – 1,6	0,35	0,15	0,12
Ovino	35 - 46	0,3 – 0,6	0,3 - 1	0,15	0,33	
Humanas	2,5	0,8 – 1	0,5	0,30		

Fuente (Varnero, 2011)

- Agitación en el Reactor

Lo que se busca con la agitación es eliminar los metabolitos que producen las bacterias metanógenas, mezclar el sustrato fresco con la población bacteriana, mantener uniforme la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios muertos sin actividad biológica. (Hilbert, 2011)

Por lo que existen varios mecanismos de agitación a utilizar, desde los más simples como un batido manual o el que provoca la entrada y salida de los líquidos, hasta avanzados equipos que involucran agitadores a hélice, recirculadores de sustrato e inyectores de gas, sin embargo estos últimos se consideran costosos. (Hilbert, 2011)



- Relación C:N

Aunque prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás, la cantidad y calidad del mismo dependerá de la composición de la materia prima utilizada, un factor importante para la eficiencia de la digestión es la relación C:N. En dónde el carbono en forma de carbohidratos proporciona energía a las células y el nitrógeno de las proteínas, nitratos y amoníaco ayuda en la construcción de estructuras celulares. (Magaña, et al., 2006)

Cuando la relación C:N es superior a 35:1 la digestión ocurre más lentamente, esto se debe a que la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo por la falta de nitrógeno, en consecuencia el tiempo de producción de biogás es más largo. Caso contrario con una relación C:N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana pues causa formación excesiva de contenido de amonio.

Por lo que una relación C:N de 20:1 hasta 30:1 permitirá que el proceso de digestión sea el óptimo, sin embargo para esto existen valores aproximados de la relación C:N de diferentes residuos (Tabla 6), los cuales se pueden tomar como referencia. (Varnero, 2011)

Tabla 6. Valores promedios aproximados de la relación C:N en excretas animales

Excretas	%C	%N	C:N
Bovino	30	1.30	25:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Equinos	40	0.80	50:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Humanas	2.5	0.85	3:1

Fuente (Varnero, 2011)

- Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST), este es un factor importante para afirmar que el proceso se efectúe satisfactoriamente. Pues a medida que aumenta el contenido de sólidos, se reduce la movilidad de las bacterias metanogénicas y por consecuencia disminuye la



eficiencia de la producción de biogás. Según (Varnero, 2011) se ha demostrado experimentalmente que no debe tener más de un 8% a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso.

Para determinar el volumen de agua que se añade a la materia prima para una proporción adecuada de sólidos totales, se necesita conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima y calcular con la siguiente ecuación:

$$\% S.T = \frac{1Kg\ excreta \times \%S.T\ excreta\ fresca}{1Kg\ excreta + W(agua)} \quad (12)$$

1.3 BIODIGESTORES

Un biodigestor es un contenedor hermético que permite la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y facilita la extracción del gas resultante para su uso como energía. El biodigestor cuenta con una entrada para el material orgánico, un espacio para su descomposición, una salida con válvula de control para el gas, y una salida para el material ya procesado (bioabono). (Guerrero, 2016)

1.3.1 Tipos de Biodigestores

Se hablara de los diferentes tipos de biodigestores que existen, para lo cual se hará una comparación de los diferentes tipos de biodigestores: continuos, discontinuos, y de dos etapas.

1.3.1.1 *Biodigestor continuo.*

La alimentación del material orgánico es constante, y la biomasa es aprovechada diariamente, los tiempos de retención son menores que los sistemas discontinuos. A este tipo de sistema pertenecen los biodigestores de mezcla completa, filtro anaerobio, plantas de lecho fluidizado, lecho de lodos, biodigestores tubulares y de cúpula fija o móvil. (Morales, Morales, & Holguín, 2016)

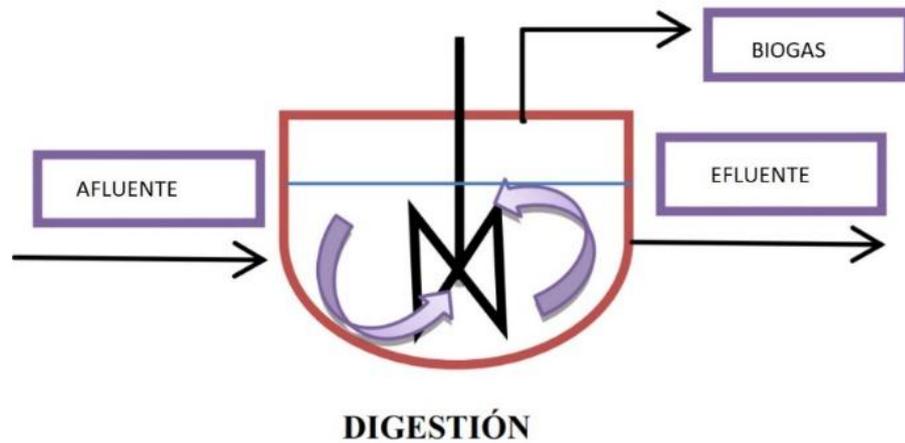


Figura 4. Esquema de un biodigestor continuo. (Morales, Morales, *et al.*, 2016)

- Biodigestor tubular: Son fabricados a base de goma o polietileno, debido a que es un sistema continuo las propiedades físico-químicas van a cambiar conforme vaya pasando por el biodigestor, teniendo como consecuencia una producción variable del biogás en cada etapa de dicho biodigestor. Las ventajas de estos biodigestores es su bajo costo de construcción, su vida útil de 10-15 años y poseer un mantenimiento sencillo. (Morales, *et al.*, 2016)

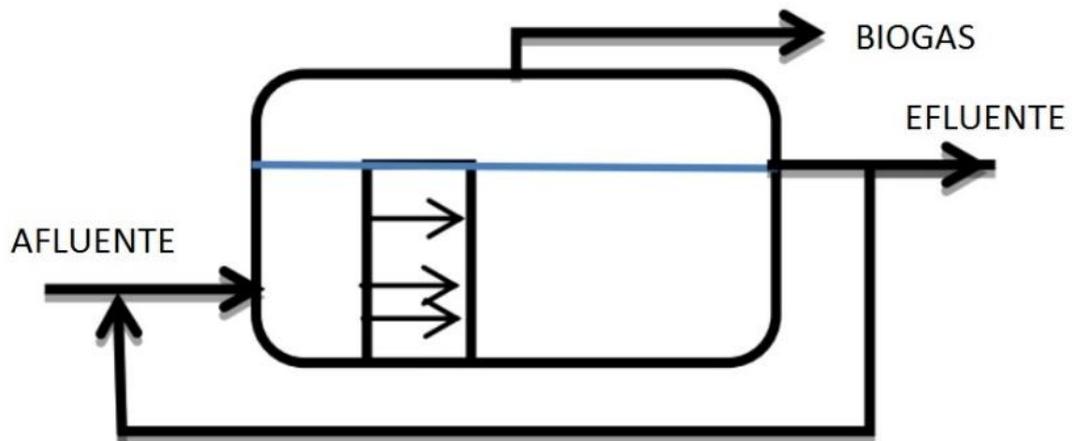


Figura 5. Esquema de un biodigestor continuo tipo tubular. (Morales, *et al.*, 2016)

1.3.1.2 Biodigestores discontinuos.

Son tanques herméticos en donde la materia orgánica permanece por tiempos prolongados en el interior de la cámara de biodigestión, estos son cargados una vez totalmente y descargados cuando concluye la producción de biogás. El biogás se almacena en un gasómetro flotante, y generalmente se emplean para materiales

celulosos que no se tratan con biodigestores continuos, ya que puede producir tapones en la entrada y salida del reactor. (Morales, et al., 2016)

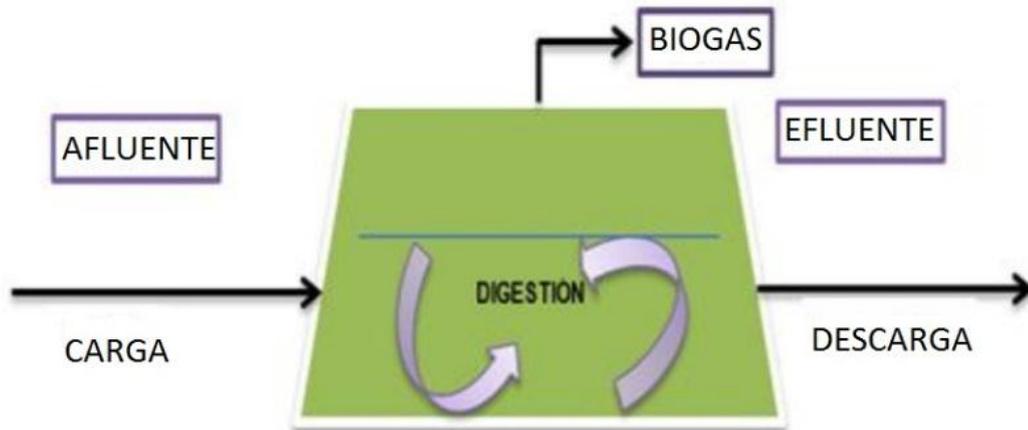


Figura 6. Esquema de un biodigestor discontinuo. (Morales, et al., 2016)

- Biodigestor discontinuo cúpula fija: Es de forma cilíndrica y está formado por un sistema de carga, cámara del digestor y recipiente de alivio. Posee una caja en donde inicialmente se mezclan los materiales orgánicos para después transportarla a la cámara de digestión, con el fin de obtener como subproducto el biogás, que se almacenará en la cúpula fija. Es económico, pero debe impermeabilizarse la cúpula, su construcción, es simple y tiene larga vida útil (Morales, et al., 2016)

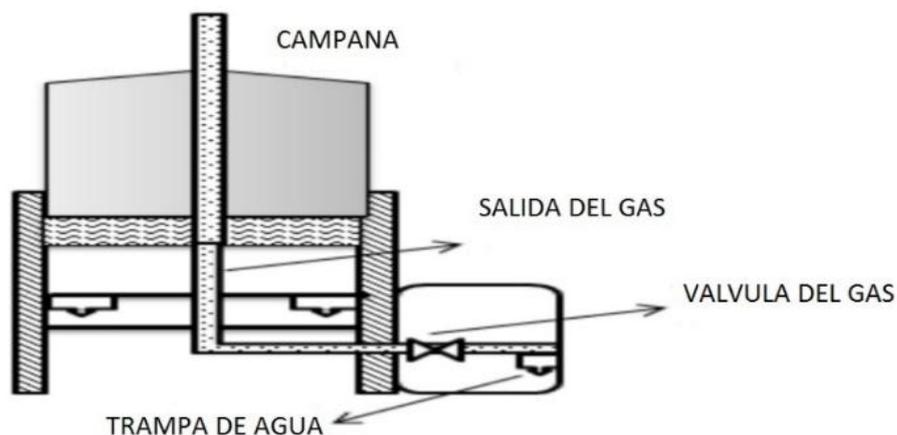


Figura 7. Esquema de un biodigestor discontinuo cúpula fija. (Morales, et al., 2016)

1.3.1.3 Biodigestor de dos etapas.

Se compone de dos biodigestores, en el primero se aplican altos tiempos de retención llevándose a cabo las etapas de hidrólisis y la acidogénica del material orgánico, pasando a un segundo reactor con bajos tiempos de retención donde concluye el proceso de degradación y se produce el biogás. Las ventajas de este biodigestor: ofrece estabilidad y seguridad, se elimina el oxígeno disuelto, se recupera el biogás rico en metano y se da un aumento cinético de la hidrólisis. (Morales, et al., 2016)

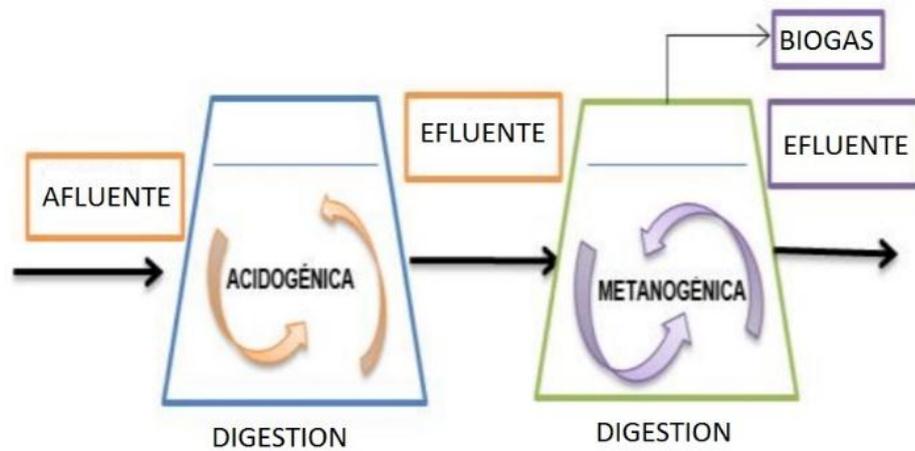


Figura 8. Esquema de un biodigestor de dos etapas. (Morales, *et al.*, 2016)



CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2 Descripción del Proceso

En principio se va a realizar la recolección de las materias primas necesarias, por lo que una parte de este capítulo detalla el proceso de producción de biodiesel para obtener la glicerina como subproducto, seguido a esto se realizará la adaptación a nivel de laboratorio de la cantidad de biodigestores y de las condiciones que estos necesitan, de acuerdo al diseño experimental 2^k que se determinó para la validación estadística. Dicha información se encuentra detallada a continuación.

2.1 PRODUCCIÓN DE BODIESEL PARA OBTENCIÓN DE GLICERINA

En la producción de biodiesel de acuerdo al proceso descrito por (Bulla, 2014), quién recomienda el método de la transesterificación como el adecuado, en este se utiliza como materia prima aceite vegetal de palma, etanol y como catalizador hidróxido de Sodio (NaOH), en cuyo proceso se detalla los cálculos a realizar para determinar la cantidad de cada uno de estas materias primas necesarias.

2.1.1 Equipos y reactivos para la producción de biodiesel

Para normal desarrollo en la producción de biodiesel con el fin de obtener la glicerina como subproducto, se necesitó de diferentes equipos, instrumentos y reactivos en determinadas cantidades, (Tablas 7 y 8).

**Tabla 7. Equipos e Instrumentos**

Descripción	Cantidad
Batidora	1
Vaso de precipitación 500ml	2
Termómetro	1
Cocina eléctrica	1
Probeta 100ml	1
Varilla de vidrio	1
Luna de reloj	1
Espátula	1
Balanza electrónica	1
Embudo de decantación 250ml	1
Pipetas	1

Tabla 8. Reactivos

Descripción	Cantidad
Aceite Vegetal	500ml
Etanol	149,20ml
NaOH	5,03g
C ₂ H ₄ O ₂	3,14ml

La cantidad de Etanol y de catalizador se calcularon tomando en cuenta la densidad y pesos moleculares de estos reactivos, dada una relación molar aceite etanol de 1:5 y un porcentaje de 0,5% de NaOH. Esta cantidad tiene como objetivo el neutralizar los ácidos grasos libres contenido en la fase esterificada. (Bulla, 2014)

Todas estas cantidades fueron calculadas para 1 experimento por motivos de los materiales disponibles en el laboratorio, sin embargo para obtener la cantidad de glicerina necesaria en el proceso de producción de biogás, se replicó 6 veces el experimento.



2.1.2 Proceso para la producción de biodiesel

El proceso descrito por (Bulla, 2014) para la obtención de la glicerina como subproducto se expone a continuación de manera resumida en el siguiente diagrama de flujo.

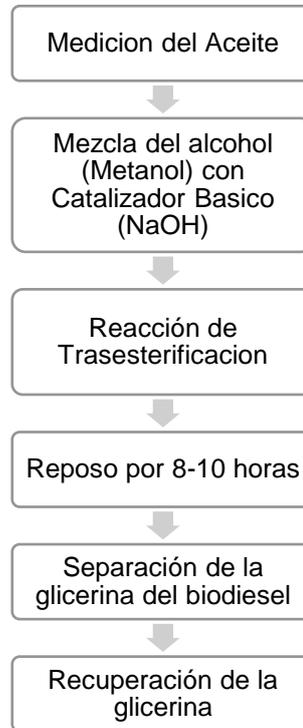


Figura 9. Esquema del Proceso General para la producción de biodiesel. (Bulla, 2014)

2.1.3 Procedimiento para la producción de biodiesel

En este punto se detallan todos los pasos mencionados en el diagrama de flujo, en otras palabras se especifica la cantidad de reactivos a utilizar, así como los diferentes instrumentos y tiempos que se requiere, con la finalidad de que el proceso resulte satisfactorio.



Medición del Aceite

- Se midió en una probeta 500ml de Aceite de palma, y se depositó en el erlenmeyer.
- Se debe eliminar el agua contenida para así evitar la formación de jabones, por lo que el aceite se lleva a la cocineta eléctrica y se calienta hasta los 60°C



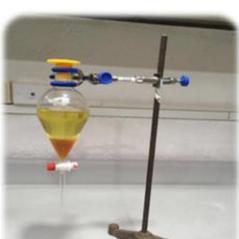
Mezclado de alcohol/catalizador básico (NaOH)

- Se midió el volumen de alcohol ya antes definido para el ensayo, y se pesó la cantidad de NaOH en un vaso de precipitación.
- El catalizador se añadió al etanol y se disolvió, siendo necesario agitación constante y en el mismo sentido, por lo que se utilizó una batidora.



Reacción de transesterificación

- El aceite se adicionó a la mezcla antes mencionada y continuó la agitación por 1 hora más, sin dejar de agitar.
- Finalizado el tiempo se agregó 3,11ml de ácido acético con el fin de bloquear la reacción de transesterificación e impedir la formación de productos no deseados.



Separación de biodiesel y glicerina

En esta etapa se empleó un embudo de decantación de 250 ml, en donde al terminar la reacción el producto que se obtuvo fue vertido al mismo, el cual al transcurrir un periodo de tiempo provoca una separación por diferencia de sus densidades.



Recuperación de la Glicerina

Al finalizar las 12 horas la recuperación se hace mediante la separación de sus fases, extrayendo la glicerina en un vaso de precipitación.

Concluida la extracción se procede a desechar de manera correcta el biodiesel sobrante en el embudo.

Figura 10. Esquema del Proceso de obtención de glicerina

2.1.4 Resultados Obtenidos de mililitros de glicerina

Para el cumplimiento de los objetivos y debido a la capacidad de los materiales utilizados se realizó cinco experimentaciones y en consecuencia a esto se obtuvo la cantidad de 346ml de glicerina.



2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

En el caso del presente proyecto de investigación se considera probar en la práctica que la adición de glicerina en diferentes porcentajes aumenta el rendimiento en la producción de biogás. Y debido a que el diseño factorial 2^k permite hacer variaciones entre valores máximos y mínimos de las variables con el menor número de experimentos, se consideró adecuado para la interpretación estadística de los resultados en este trabajo de investigación.

El diseño 2^k permite explorar una zona determinada del dominio experimental y determinar una dirección prometedora para la optimización posterior. Una de las grandes ventajas de este diseño es que no requiere un software especializado para construir la matriz ni para analizar sus resultados.

Por lo que tomando en cuenta las variables definidas y adaptadas a la matriz del propio diseño, se debe realizar un total de 10 experimentos, 8 que contenga las variaciones de glicerina, y 2 muestras testigo con los materiales orgánicos a degradar pero sin glicerina, ya que si el control no está presente, es imposible concluir algo definitivo en relación al experimento. (Ferré, 2004)

2.2.1 Justificación de Variables

De acuerdo a las necesidades del diseño experimental para la construcción de la matriz se establece dos niveles un máximo y un mínimo siendo (+ y - respectivamente), en consecuencia a esto se considera importante definir las variables a utilizar.

2.2.1.1 Temperatura.

La temperatura es una variable dependiente del proceso, debido a la relación existente del medio en el cual se desarrollan los microorganismos presentes, por lo que teniendo en cuenta las temperaturas óptimas que presenta la literatura, se va a trabajar en un rango mesófilo, siendo 35 y 45 °C las propuestas para el ensayo.



2.2.1.2 Porcentaje de Glicerina.

Según la literatura reportada por (Santibáñez, et al.,2011) se considera que la adición de la glicerina aumenta en un 50 a 200% el rendimiento de la producción del biogás, reportando resultados satisfactorios con el uso de cantidades del 2 hasta el 9%, de acuerdo a esto, para la presente experimentación se propuso dos porcentajes 4 y 8%.

2.2.1.3 Materia Orgánica.

Variable relacionada directamente con la producción de biogás, por lo que tomando en cuenta su diferente composición química, y estudios realizados por (Hilbert, 2011) el excremento porcino proporciona rendimientos más altos que el excremento bovino, en consecuencia si se modifica el tipo de sustrato a utilizar se va a producir cambios en el rendimiento, razón por la cual, para este proyecto se consideró dichos residuos como máximo y mínimo respectivamente.

Una vez establecidos los valores de cada una de las variables se puede representar según los niveles a estudiar cada dominio experimental (Tabla 9).

Tabla 9. Factores y su dominio experimental

Factores		Dominio Experimental	
		Nivel (-)	Nivel (+)
X ₁	% Glicerina	35	45
X ₂	Temperatura (°C)	4	8
X ₃	Materia Orgánica	Vaca (V)	Cerdo (C)

Variable Respuesta (Y): mililitros de biogás

2.2.2 Construcción de la matriz de un diseño factorial completo 2³

La matriz se construye en un orden estándar, regido por la interacción entre las variables (Tabla 10), por lo que los experimentos consideran todas las combinaciones de cada uno de los niveles de un factor con todos los niveles de los otros factores. (Ferré, 2004)

**Tabla 10.** Matriz de experimentos para el diseño factoriales completos 2^3

Experimentos	X_1	X_2	X_3	Respuestas
1	-	-	-	y_1
2	+	-	-	y_2
3	-	+	-	y_3
4	+	+	-	y_4
5	-	-	+	y_5
6	+	-	+	y_6
7	-	+	+	y_7
8	+	+	+	y_8

Fuente (Ferré, 2004)

De acuerdo a las variables en estudio la tabla experimental propuesta para el diseño quedaría de la siguiente manera:

Tabla 11. Plan de Experimentación

% Glicerina	Temperatura (°C)	Materia Orgánica
4	35	Vaca
8	35	Vaca
4	45	Vaca
8	45	Vaca
4	35	Cerdo
8	35	Cerdo
4	45	Cerdo
8	45	Cerdo

2.2.3 Prueba de selección de variables

Para la selección de variables se utiliza una herramienta llamada screening, la cual es un barrido que se realiza a los resultados obtenidos de los diferentes experimentos, para lo cual se parte de la matriz de efectos que son las interacciones existentes entre las variables en sus distintos niveles, esta matriz se construye de la matriz de experimentos, a la cual se añade columnas que son el producto de cada una de las variables ya determinadas (Tabla 12). Cabe recalcar que estas columnas añadidas



sólo indican como combinar las respuestas para calcular los efectos, por lo que no implican nueva experimentación. (Ferré, 2004)

Tabla 12. Matriz de los efectos

	G	T	M.O	G_xT	G_xM.O	T_xM.O	G_xT_xM.O
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

Fuente (Ferré, 2004)

G: % de glicerina

T: Temperatura

M.O: Materia Orgánica

G_xT: Interacción entre variables

Utilizando la matriz 12 se construye una tabla de cálculos para obtener los efectos producidos por las variables en las experimentaciones realizadas, en donde la variable “y” es la respuesta para cada una de las experimentaciones, (Tabla 13), los cuales son necesarios para la interpretación de los resultados.

Tabla 13. Cálculo de los efectos

Efecto	Cálculos	
Promedio	$(+ y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) / 8$	P
G	$(- y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) / 8$	a ₁
T	$(- y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) / 8$	a ₂
M.O	$(- y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) / 8$	a ₃
G _x T	$(+ y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) / 8$	a ₁₂
G _x M.O	$(+ y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) / 8$	a ₁₃
T _x M.O	$(+ y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) / 8$	a ₂₃
G _x T _x M.O	$(- y_1 + y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) / 8$	a ₁₂₃

Fuente (Ferré, 2004)



Al tener la tabla de interacciones con sus respectivos signos se procede a calcular los coeficientes necesarios para la evaluación de las variables que rigen el proceso de producción, para lo cual con la ayuda del excel se elabora una tabla de signos y se procede a calcular dichos coeficientes (Tabla 28).

Una vez obtenidos todos los coeficientes se procede a evaluar su importancia, en donde se toma los valores más altos, tanto de los efectos principales como de las interacciones sin importar su signo, una vez identificadas dichas variables se establece la ecuación lineal que es la que va a controlar el modelo.

Como siguiente paso se procede a la evaluación de sus respectivos signos, para lo cual si es positivo (+) se toma el nivel máximo, y si es negativo (-) el nivel mínimo, y de esta manera se identifica que efectos principales y que interacciones son importantes para el proceso.

2.3 PROCESO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Se aplicó el proceso de co-digestión anaerobia para la producción de biogás descrito por (Magaña, et al., 2006), a partir de estiércol de vaca y de cerdo, en el cual se recomienda someter a estas materias primas a una determinación de humedad, con el fin de determinar la concentración a utilizar en cada uno de los biodigestores.

Se empleó 8 erlenmeyer con capacidad de 1 litro como depósito de la mezcla agua-excremento-glicerina y 2 adicionales únicamente con agua-excremento. De cada uno de los experimentos se determinó el pH inicial para ver si era necesario realizar correcciones o si cumplían con las condiciones necesarias y se introdujeron dentro de un contenedor con agua calentada por una resistencia eléctrica para mantener la temperatura adecuada para el crecimiento de las bacterias metanogénicas.

2.3.1 Equipos y reactivos para la producción de biogás

Para el proceso productivo planteado en la investigación fue necesario de diferentes equipos, instrumentos y reactivos (Tablas 14 y 15).

**Tabla 14. Equipos e instrumentos**

Descripción	Cantidad
Erlenmeyer 1L	10
Vasos de precipitación 500ml	4
Termómetro	6
Probetas	10
Varilla de vidrio	4
Luna de reloj	4
Espátula	1
Balanza electrónica	1
Parafilm Rollo	1
Tijeras	1
Botellas 500ml	10
Tijeras	2
Equipo de Venoclisis	40
Agujas hipodérmicas	60
Caja de Espuma flex	1
Breaker eléctrico de 20 AMP	1
Niquelina	1

Tabla 15. Reactivos

Descripción	Cantidad
Glicerina	300ml
Excremento de Vaca	5kilos
Excremento de cerdo	5kilos
Agua Lluvia	12 L
Agua Destilada	10L
NaOH	500g

2.3.2 Proceso para la producción de biogás

El proceso descrito en (Magaña, et al.,2006) para la producción de biogás, de manera resumida se expone en el siguiente diagrama de flujo.

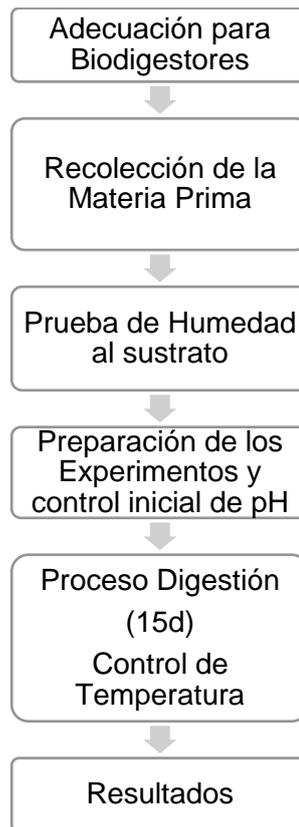


Figura 11. Esquema del Proceso General para la producción de biodiesel. (Bulla, 2014)

2.3.3 Procedimiento para la producción de biogás

A continuación se detallan cada uno de los pasos mencionados en el diagrama de flujo, en otras palabras se especifica las cantidades que se utilizaron, así como los tiempos y temperatura a controlar, con la finalidad de que el proceso resulte satisfactorio.

2.3.3.1 Adecuación para los Biodigestores.

Se elaboró un calentador a baño maría, con el fin de mantener las condiciones de temperatura necesarias, por esta razón a una caja de espuma flex de (1,27x0,53x 0,33)m se le adaptó una niquelina conectada a un breaker eléctrico de 20 amperios, donde se introdujeron los biodigestores.



Figura 12. Adaptación para biodigestores

2.3.3.2 Recolección de la materia prima.

La toma de la materia prima se hizo de un criadero, ubicado en el sector de San Joaquín con coordenadas 2°54'06.0"S; 79°02'55.3"W (Figura 13). El excremento se recolectó por dos días para obtener la cantidad que se necesitaba, el mismo que era fresco, con precaución de no recolectar excremento seco o que contenga residuos inorgánicos que dificultan la digestión.

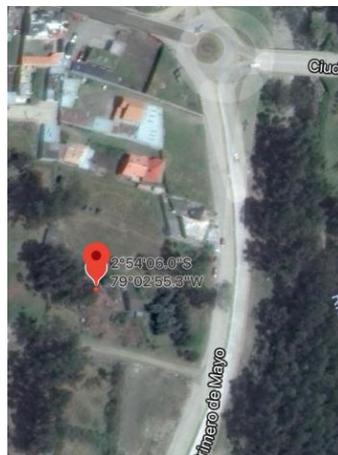


Figura 13. Coordenadas del lugar de recolección de la muestra

2.3.3.3 Pruebas de Humedad y pH del sustrato y co-sustrato.

- Determinación de porcentaje de Humedad del sustrato

Se siguió el proceso descrito en (Magaña, et al.,2006), dónde se introdujo 4 cápsulas de porcelana a la estufa por un periodo de 24h para determinar el peso de las



capsulas secas, posterior se añadió la cantidad de muestra a analizar, y se llevó a la estufa por 48h a 105 ± 5 °C, nuevamente transcurrido el tiempo se llevó a la balanza y se repitió el procedimiento para analizar los resultados. (Tabla 26)

Teniendo los % de humedad de cada una de las muestras se realizó los cálculos con la ecuación 12, para determinar la cantidad de agua que se debe añadir para realizar las experimentaciones.

2.3.3.4 Preparación de los Experimentos y control inicial de pH

En base a los resultados de humedad y a la ecuación 12 se determinó la concentración que se va a utilizar en cada experimento, para lo cual mediante literatura se tomó una concentración de 10% como la óptima dando una relación excremento-agua de 1:2,5 respectivamente. Por lo que tomando en cuenta que la capacidad del reactor es de 1L pero lo recomendado en la literatura es utilizar un 70 al 80%, en esta investigación se tomó el 80% como referencia para determinar las cantidades a utilizar.

Una vez determinada la relación excremento-agua, se ajusta a las condiciones de glicerina a utilizar siendo estas el 4 y el 8 %, quedando las cantidades expresadas en la siguiente tabla:

Tabla 16. Cantidades determinadas para la experimentación

Materias Primas		Cantidades
Materia Orgánica		210 g
Agua de lluvia		525 ml
Glicerina	4 %	29,40 g
	8 %	58,80 g

- Determinación de pH de los experimentos.

Para determinar el pH se utilizó el potenciómetro con lo que se pudo notar que para cada experimento con adición de glicerina este se encontró en el rango óptimo, sin embargo las muestras testigo tenían un pH mayor (Tabla 18), el cual según literaturas puede ser corregido con la adición de ácido acético, pero como las muestras originales

no tienen esta corrección no se le adicionará para realizar las respectivas comparaciones.

Tabla 17. Control de pH en los experimentos

Experimentos	pH
Testigo A (Excremento de cerdo)	8,13
Testigo B (Excremento de Vaca)	7,68
	<u>%Glicerina</u>
	4
Disolución con excremento de vaca	6,79
	8
Disolución con excremento de vaca	7,07
	4
Disolución con excremento de vaca	7,07
	8

- Preparación de los Experimentos.

Teniendo las cantidades que se van a utilizar en cada biodigestor se trabajó en dos lotes de experimentación, a 35 y a 45°C realizando sus respectivas réplicas, para lo que se pesó la materia orgánica para cada experimento, se realizó las diluciones con agua lluvia y se introdujo en cada uno de los biodigestores, para finalmente agregar la cantidad de glicerina determinada (Figura14).

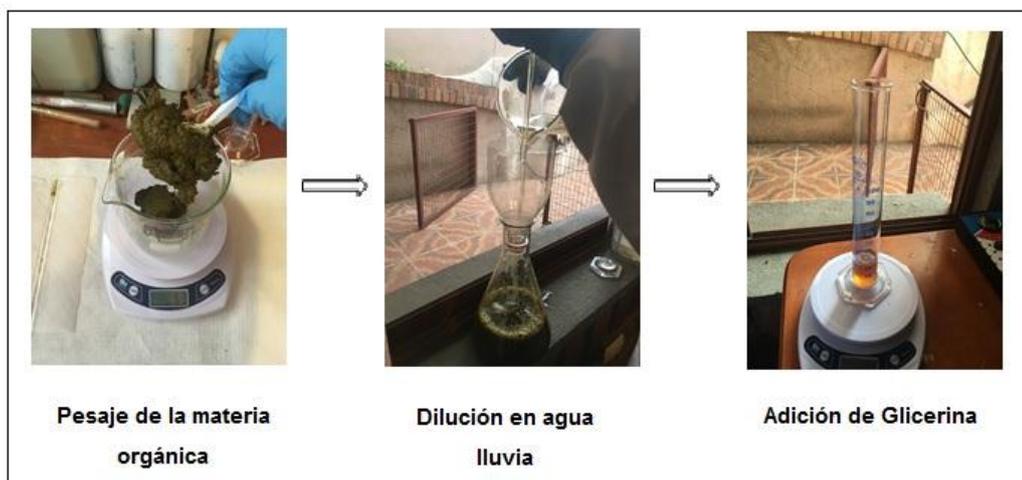


Figura 14. Preparación de los experimentos

Finalmente cuando se tuvo la solución completa en cada biodigestor se selló con dos capas de plástico de polietileno en cada uno, adicional a esto se colocó una capa de parafina y se introdujo una aguja hipodérmica que permitió el paso del biogás, en dos de los experimentos se introdujo termómetros para controlar la temperatura en su

interior, se selló bien con más parafina para asegurar que no existan fugas y cada uno fue conectado al equipo de venoclisis para ser introducidos en el calentador a la primera temperatura de trabajo (35°), y se repitió el procedimiento a 45°C (Figura15).



Figura 15. Montaje de los biodigestores

2.3.3.5 Proceso Digestión.

El proceso de digestión se dio en un periodo de 15 días, en este tiempo se fue controlando su temperatura, liberando presión y agitando manualmente cada biodigestor para asegurar una mejor superficie de contacto y evitar que se formen costras en su interior. Todo este proceso se evidenció diariamente notando los diferentes cambios que se dieron en el experimento (Figura 16).



Figura 16. Formación de costras previo a la agitación



2.3.4 Determinación de Resultados con la Técnica AME

La determinación de la cantidad de biogás generado se realizó mediante la técnica de la Actividad Metanogénica Específica (AME), la cual es una herramienta que se utiliza para determinar la capacidad de captación que tienen las bacterias metanogénicas para producir biogás, lo que permite determinar el potencial de la biomasa para convertir el sustrato en metano y gas carbónico. (Torres & Pérez, 2010)

Este método consiste en cuantificar el volumen de metano producido mediante el uso de sustancias como es el Na(OH) o el K(OH), que son capaces de reaccionar con el CO₂ que se encuentra en el biogás. Para lo que es recomendable que el pH de estas bases sea superior a 12 para asegurar la captación de CO₂ producido.

Estas sustancias desplazantes tienen la propiedad de acumular dióxido de carbono dejando que el gas metano pase, este gas ejerce presión haciendo que la solución se desplace en forma de goteo. La cantidad de solución que se acumula hace referencia a la cantidad de gas que se produce, dicho goteo culmina cuando la presión del interior donde se encuentra la solución y la atmosférica se igualen. (Manobanda & Heras, 2015)

2.3.4.1 Preparación para la técnica.

Para la adecuación de la técnica de AME se utilizó 10 recipientes de 600ml de capacidad, en las cuales se introdujo 500ml de la solución de sosa preparada al 3%. En cada tapa de estos envases se realizó agujeros con el fin de introducir la manguera que expulsaba el biogás y el equipo de venoclisis por donde la solución iba a ser desplazada por medio de goteo. Estas botellas se colgaron boca abajo a nivel inferior de los biodigestores, y al final se adaptó una probeta para realizar la recolección de la solución desplazada (Figura17)

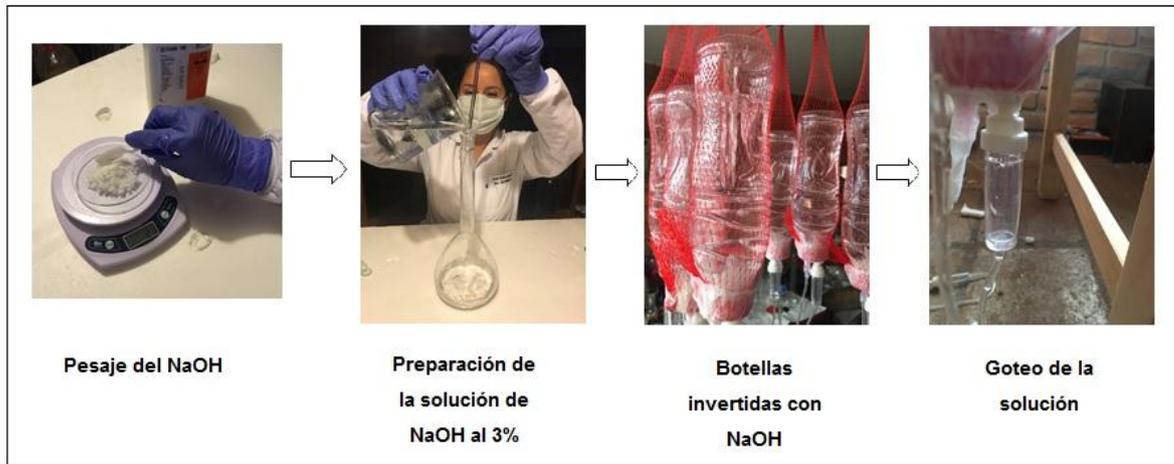


Figura 17. Preparación para la técnica AME

2.3.4.2 Monitoreo.

Los controles se realizaron cada 4 días para lo cual se liberó presión abriendo la llave para que el gas ingrese a la solución de Na(OH), se esperó unos segundos y nuevamente se cerró la llave, al ingresar el metano la solución reaccionó con el dióxido de carbono y esta empezó a burbujear, por lo que debido a la presión que ejerce el biogás en el interior de la botella el NaOH empezó a desplazarse.

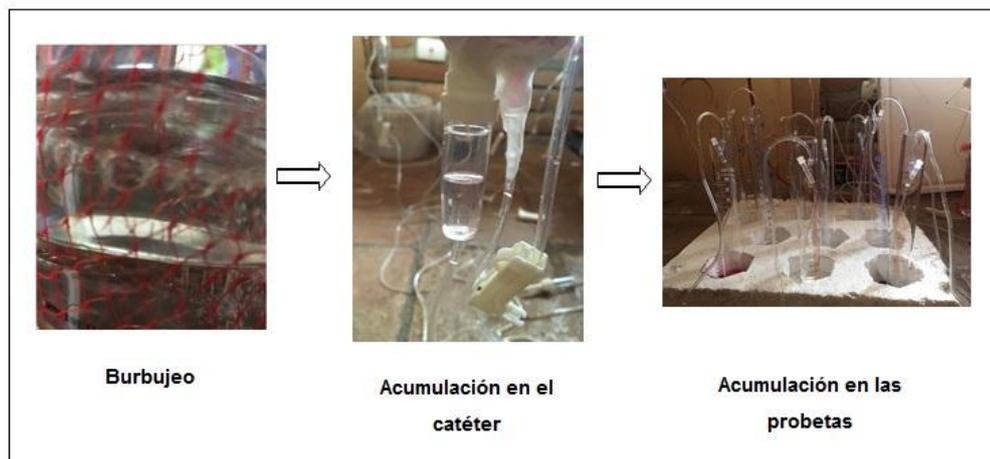


Figura 18. Monitoreo de la producción de biogás

2.3.4.3 Determinación cualitativa de la presencia de biogás.

Una forma cualitativa de demostrar que se generó biogás dentro de los biodigestores fue extraer con una jeringa el gas acumulado en el interior de los mismos y quemarlo en una flama pequeña, el cual dio una coloración de llama azul (Figura 19).



Figura 19. Quema de biogás



CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3 CANTIDAD DE METANO

Teniendo en cuenta los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, se muestran los resultados que se obtuvieron en las experimentaciones realizadas, en donde se incluyen por cada experimentación una muestra testigo (biodigestores, sometidos a las mismas condiciones de experimentación, que permiten comparar el incremento de biogás producido al utilizar glicerina como co-sustrato).

Los resultados del metano generado se expresan en mililitros de NaOH, (de acuerdo a la técnica AME). Los que se exhiben en las tablas 18-23. Tanto muestras testigo como las propuestas, se basan en la matriz experimental definida anteriormente.

Cabe recalcar, que fue posible obtener biogás, utilizando excremento porcino y bovino, controlando las variables involucradas en el proceso de bio-digestión anaerobia, como lo realizó (Magaña, et al., 2006), sin la adición de inóculo o de un co-sustrato.

Demostrando que no es necesario trabajar con ganado bovino que sea exclusivamente lechero como en la investigación propuesta por (Augusto, et al., 2015), pues utilizando estiércol de vaca no criada para un fin específico, fue posible obtener metano satisfactoriamente.

- **Experimentación #1**

Muestras Testigo

Tabla 18. Cantidad de Biogás en muestras testigo 1

Sustrato	Temperatura °C	Metano (ml)
	35	44
Vaca	45	49
	35	66
Cerdo	45	71



Tabla 19. Cantidad de Biogás en experimentación 1

% Glicerina	Temperatura (°C)	Materia Orgánica	Metano (ml)
4	35	Vaca	62
8	35	Vaca	51
4	45	Vaca	71
8	45	Vaca	59
4	35	Cerdo	107
8	35	Cerdo	79
4	45	Cerdo	122
8	45	Cerdo	91

- **Experimentación # 2**

Muestras Testigo

Tabla 20. Cantidad de biogás en muestras testigo 2

Sustrato	Temperatura °C	Metano (ml)
	35	42
Vaca	45	51
	35	67
Cerdo	45	69

Tabla 21. Cantidad de Biogás en experimentación 2

% Glicerina	Temperatura (°C)	Materia Orgánica	Metano (ml)
4	35	Vaca	59
8	35	Vaca	50
4	45	Vaca	73
8	45	Vaca	61
4	35	Cerdo	111
8	35	Cerdo	80
4	45	Cerdo	119
8	45	Cerdo	88



Experimentación # 3

- **Muestras Testigo**

Tabla 22. Cantidad de biogás en muestras testigo 3

Sustrato	Temperatura °C	Metano (ml)
	35	42
Vaca	45	50
	35	66
Cerdo	45	71

Tabla 23. Cantidad de biogás en experimentación 3

% Glicerina	Temperatura (°C)	Materia Orgánica	Metano (ml)
4	35	Vaca	60
8	35	Vaca	51
4	45	Vaca	71
8	45	Vaca	61
4	35	Cerdo	108
8	35	Cerdo	79
4	45	Cerdo	118
8	45	Cerdo	90

3.1 RENDIMIENTO DE BIOGÁS

Según los resultados obtenidos, se calculan los porcentajes de rendimiento con la ecuación 13, en cada una de las experimentaciones y se obtiene un resultado promedio, para así determinar, si se produjo incremento de biogás al utilizar glicerina como co-digestor (ver tabla 24).

$$\%R = \frac{Y_1 - M.T}{M.T} * 100 \quad (13)$$



Donde:

- %R: % Rendimiento
- Y₁: Cada uno de los resultados de Metano
- M.T: Muestra Testigo

Tabla 24. % de Rendimiento de Biogás

Experimento 1 (%)	Experimento 2 (%)	Experimento 3 (%)	Promedio (%)
41	40	43	41
16	19	21	19
45	43	42	43
20	20	22	21
62	66	64	64
20	19	20	20
72	72	66	70
28	28	27	27

De acuerdo a los resultados exhibidos, en todas las experimentaciones se produjo un incremento al añadir glicerina en sus dos porcentajes, sin embargo, se observa que al trabajar con glicerina al 4% se produjo un incremento mayor, siendo este del 70% en comparación al 8% que solo incremento en un 27%.

Al trabajar con estiércol porcino se pudo comprobar que los incrementos de biogás al trabajar con porcentajes del 4 al 6% a 45°C están relacionados como es el caso de la experimentación hecha por (Amon et al., 2006) quien obtuvo un rendimiento de biogás del 74% trabajando a temperatura mesófilas.

Estos resultados pueden deberse a que, al tener un exceso de carbono, no hay suficiente nitrógeno para la generación de nuevas estructuras celulares, por lo que al trabajar con porcentajes mayores al 8% puede no ser beneficioso, al utilizar materias primas como las propuestas, mientras que si se trabaja con sustratos con contenidos de carbono menores, podría ser beneficioso.

Razón por la cual (Indiveri, et al., 2011) recomienda trabajar con residuos ricos en nitrógeno si se desea trabajar con % mayores de glicerina, tal es el caso del orujo de



uva propuesto en su ensayo, quién tuvo rendimientos mayores al trabajar con el 15% de glicerina.

En esta investigación al trabajar con el 8% se produjo un aumento del 27%, caso contrario en (Augusto, et al., 2015), en donde al trabajar con el 6% no aumento si no mas bien se redujo el rendimiento en un 41%, discrepando con los resultados obtenido en este proyecto.

3.2 DEFINICIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO

Los resultados obtenidos se sometieron al respectivo análisis con ayuda de la herramienta conocida como screening (barrido), con el fin de determinar las variables experimentales y las interacciones que tienen importancia en el proceso (Tabla 25). Coeficientes que se determinaron a partir de la matriz de efectos (Tablas 13 y 28), obteniendo la ecuación que rige el modelo (14), siendo la que describe la relación lineal, entre las variables experimentales que tienen influencia en el proceso.

$$Y = 80.04 - 10.04 a_1 + 5.29 a_2 + 19.29 a_3 - 4.79 a_1 a_3 \quad (14)$$

Tabla 25. Coeficientes de detección

Coeficientes	
P	80,04
a1	-10,04
a2	5,29
a3	19,29
a12	-0,29
a13	-4,79
a23	-0,04
a123	-0,13

3.2.1 Interpretación de coeficientes:

Para la definición de las variables de trascendencia experimental, se toman los coeficientes más altos en valor absoluto, siendo estos a1, a2, a3, y la interacción a13,



una vez definidas las mismas, se toma en cuenta el signo para la respectiva discriminación, como se expone a continuación:

Efectos principales

- Coeficiente a3 perteneciente al **sustrato**, que al poseer signo positivo (correspondiendo al valor máximo de esta variable), define que la variable que rige a la producción de biogás propuesta, pertenece al excremento de cerdo.
- El coeficiente a1 define a la **glicerina**, como una variable que influye en el proceso de forma significativa y puesto que su valor es negativo (correspondiendo al valor mínimo de esta variable), obedece al valor del 4%

Interacciones

- La interacción a13 es la que tiene significancia en el proceso, la misma que por su valor negativo cumple con la ley de los signos, siendo a1 el nivel mínimo (-) y a3 el nivel máximo (+), comprobándose lo establecido referido a las variables que rigen el modelo estadístico (ver tabla 26).

Tabla 26. Variables que rigen el proceso

Variables	Niveles	
	Mínimo (-1)	Máximo (+1)
a1: % Glicerina	4	8
a2: Temperatura °C	35	45
a3: Mat. Orgánica	V	C

V: Excremento de vaca

C: Excremento de Cerdo

Corroborando a otros investigadores como (Augusto, et al., 2015), quienes al trabajar con una temperatura menor (30°C) obtienen de igual manera resultados satisfactorios, por lo que se puede deducir que mientras las variaciones de temperatura no vayan de un rango a otro no se observa mayor incremento en la producción de biogás.



CAPITULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Existen varios métodos para la producción de biogás, sin embargo, los procesos que mejor se ajustaron a las necesidades de este proyecto, debido a los sustratos y co-sustratos a utilizar, el tratamiento a las materias primas, los equipos que se usaron y la metodología seguida, fue la descrita por Luis Magaña y Claudia Santibáñez siendo el adecuado el proceso de biodigestión anaerobia.
- Las características de producción que se establecieron a partir de esta investigación fueron; como sustrato el estiércol de cerdo, a una temperatura de 45°C, y trabajar con el 4% de glicerina, pues al trabajar con estas condiciones se nota un incremento del 40, 6 y 70 % respectivamente.
- Mediante el uso de diseño experimental se estableció que la concentración óptima de glicerina en el proceso es la adición del 4% de la misma, pues se dio un rendimiento del 70% en la producción de biogás, generando un impacto significativo. Sin embargo también se determinó que a valores superiores al 8% el metano no aumenta de manera considerable si no solo en un 16%, debido al exceso de carbono.
- Teniendo en cuenta todos estos parámetros, se comprobó que se obtuvo un incremento significativo al utilizar glicerina como co-sustrato para la producción de biogás. Logrando así, optimizar la producción del mismo, trabajando con las condiciones establecidas mediante diseño experimental, y de esta manera se pudo dar un uso a la glicerina como subproducto de la elaboración del biodiesel.



4.2 RECOMENDACIONES

- Uno de los indicadores de normal desarrollo de la reacción, es la ausencia del olor en todo el proceso, debido a que el metano es inodoro, por tal razón se recomienda sellar bien los biodigestores, y utilizar materiales de trabajo, que ayuden a evitar fugas del biogás.
- Replicar el trabajo de investigación proponiendo un rango de glicerina alrededor del establecido con las mismas materias primas, o variando el tipo de materia prima, proponiendo contenidos de nitrógeno elevado, y analizar la probabilidad del empleo de glicerina en porcentajes mayores.
- El método AME, resulto eficaz para la medición de la cantidad de metano, mas no la calidad del mismo, por lo que si se deseara analizar la misma, se recomienda la técnica de cromatografía de gases (CG), la principal fuente de error al aplicar AME son las fugas, por lo que se recomienda adquirir la suficiente destreza con el material armado, antes de realizar las determinaciones.
- Se recomienda la adquisición de un biodigestor automatizado para la carrera, pues permitiría el desarrollo de más investigaciones similares a la propuesta, sin presentar mayores limitaciones para un análisis de datos.



BIBLIOGRAFÍA

- Amon, T., Kryvoruchko, V., & Bodiroza, E. (2008). *Optimización del rendimiento de metano de la digestión anaeróbica del estiércol: efectos de los sistemas lácteos y de la administración de suplementos de glicerina.* .
- Augusto, F., Siqueira, J., Friedrich, L., Lenz, A. M., Camargo, C. E., & Melegari, S. N. (2015). *Co-digestion of crude glycerin associated with cattle manure in biogas production in the State of Paraná, Brazil.* Universidad Estatal do Oeste do Paraná, Laboratorio de Energia, Cascavel-Paraná. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/3032/303250905004/>
- Bahamonde, L. (2014). *La Influencia de las Tendencias Globales de los Biocombustibles en el sector agrícola del Ecuador.* Quito. Retrieved from <http://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/3800/1/T1357-MRI-Bahamonde-La%20influencia.pdf>
- Barón, M., Huertas, I., & Orjuela, J. (2013). *Biodiesel supply chain management: A survey paper.* Bogotá. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/4988/498850176006.pdf>
- Bautista, C. (2011). *Subproductos Generados en el Proceso de producción de Biodiesel a partir de aceite de Tempate.* El Salvador: Universidad Francisco Gavidia. Retrieved from http://icti.ufg.edu.sv/doc/SUBPRODUCTOS_DE_BIODISEL.pdf
- Betancourt, C., Mello, R., Castellanos, L., & Campos, S. (2016, Julio). *Glycerin as byproduct of biodiesel production, its characteristics.* Retrieved from SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000300001
- Bionero. (2010). *Que materia prima se utiliza para la producción del biogas.* Retrieved from <http://www.bioero.com/biotecnologia/que-materia-prima-se-utiliza-para-la-produccion-de-biogas.html>
- Bragachini, I., Mathier, I., Méndez, I., Bragachini, I., & Saavedra, I. (2014). *Oportunidades del sector agropecuario y agroindustrial argentino para la generación de.* Retrieved from <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/54-Oportunidades.pdf>



- Bulla, E. A. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Mecánica y Mecatrónica, Bogotá. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/45935/1/02300238.2014.pdf>
- Camps, M., & Martín, F. (2008). *Los Biocombustible*. Madrid: Mundi-Prensa. Retrieved 2017
- Castrillón, L., Fernandez, Y., Ormaechea, P., & Marañón, E. (2013). *Methane production from cattle manure supplemented with crude glycerin from the biodiesel industry in CSTR and IBR*. Gijón. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412014307>
- Delgado, E. (2000). *Obtencion de biogas (CH4) a partir de estiércol de ganado bovino y su aprovechamiento*. Cuenca.
- Erenovable. (2015, Enero). *Biogas: El gas combustible alternativo*. Retrieved from <https://erenovable.com/biogas-el-gas-combustible-alternativo/>
- Esteire, E., Madrid, A., & Madrir, A. (2010). *Energías Renovables. Manual Técnico*. Mundi.Prensa.
- Fernández, A., Herreras, Y., Lumbreras, J., & Pons, G. (2006). *Biodiésel Y Cooperación para el desarrollo*. Madrid. Retrieved from <http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/cd2/index/assoc/ingenier/ossf0003.dir/ingenierossf0003.pdf>
- Fernandez, J. (2010). *Guía completa de la Biomasa y los Biocombustibles*. Madrid: A. Madrid Vicente.
- Ferré, J. (2004). *El Diseño Factorial Completo 2k*. Universidad Rovira i Virgili, Departamento de Química Analítica y Química Orgánica, Tarragona. Retrieved from <http://rodi.urv.es/quimio/general/doecast.pdf>
- Fuertes, Á. (2012). *Study of the anaerobic co-digestion of livestock wastes with agroindustrial substrates*. León. Retrieved from http://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/2241/tesis_08feb2.PDF?sequence=1
- Fundación de fomento de exportaciones de aceite de palma y sus derivados de origen Nacional (FEDAPAL). (2017). *Ficha Técnica Palma*. Retrieved from <http://fedapal.org/web2017/index.php/estadisticas/ficha-tecnica-palma-2017>
- García, E. (2005, Junio 12). *La microbiota intestinal del cerdo*. Retrieved from https://www.3tres3.com/nutricion/la-microbiota-intestinal-del-cerdo_1188/



- Gonzalez, V. (2013). *Bacterias metanogénicas y halófitos extremos*. Retrieved from <https://biologia.laguia2000.com/microbiologia/bacterias-metanogénicas-y-halofitos-extremos>
- Guerrero, L. (2016, Febrero 26). *About Español*. Retrieved from <https://www.aboutespanol.com/que-es-un-biodigestor-3417683>
- Gutiérrez, G., Fernández, I., Meza, M., Fuentes, F., Balderas, J., & Moroyoqui, P. (2012). *Biogás: Una alternativa ecológica para la producción de energía*. Retrieved from http://www.semanaciencia.guanajuato.gob.mx/ideasConcyteg/Archivos/85_1_GUTIERREZ_GARCIA_ET_AL.pdf
- Hernandez, J. (2012). *Catalizador sólido en la obtención de biodiesel*. Según la ASTM se le puede dar una . Retrieved from <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/499/62241s.pdf?sequence=1>
- Hernandez, J., Acevedo, J., Valdéz, C., & Posso, F. (2015). *Evaluation of using alternative routes of glycerin obtained in the biodiesel production: a review*. Barranquilla . Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612015000100008
- Hilbert, I. (2011). *Manual para la producción de biogás* . Instituto de Ingeniería Rural, Castelar. Retrieved from <http://www.kpetic.com/sites/default/files/Manual%20para%20la%20produccion%20de%20biogas%20del%20IIR.pdf>
- Holm, J., Nielsen, H., Seadi, A., & Popiel, O. (2009). *The future of anaerobic digestion and biogas utilization*. Retrieved from https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/130290/mod_resource/content/1/The_future_of_anaerobic_digestion_and_biogas_utilization_-_Holm.pdf
- Huamani, I. (2011). *Densidad en líquidos: Método del Picnómetro*. Laboratorio de Físico-Química. Retrieved from <http://www.geocities.ws/todolostrabajossalfo/fico4.pdf>
- Indiveri, M., Pérez, P., Van Stralen, N., Oliva, A., Núñez, J., & Llamas, S. (2011). *Utilización de Glicerina Residual de Producción de Biodiesel*. Retrieved from http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfuseen_2011/trabajos/12-094.pdf



- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2017). *Proyecto Piñón en Ecuador - Galápagos el gran beneficiario*. Retrieved from <http://www.iica.int/es/noticias>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Madrid. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
- Izquierdo, J., Galán, M., Jutglar, L., & Villarrubia, M. (2012). *Revalorización de la glicerina para producir aditivos de combustibles mediante eterificación con olefinas C5*. Retrieved from <http://www.analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/viewFile/211/204>
- Jara, L., & Moscoso, D. (2003). *Diseño de un biodigestor y construcción de un prototipo*. Cuenca.
- Krebs, C. (1989). *Ecological Methodology*. Columbia, Estados Unidos.
- Luis A. Condo, L., & Pazmiño, J. (2015). *Diseño experimental en el desarrollo del conocimiento científico de las ciencias agropecuarias*. Escuela Superior Politécnica del Chimborazo., Instituto de Investigaciones, Riobamba. Retrieved December 2017, from http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/pdf/23/dise%C3%B1o%20experimental%20en%20el%20desarrollo%20del%20conocimiento%20cient%C3%ADfico%20de%20las%20ciencias%20agropecuarias_1.pdf
- Luna, A. F. (2014). *Determinación del Potencial de Residuos Sólidos de Gallina de Postura, Ganado Vacuno y Porcino, en la Provincia de Coronel Portillo y Padre Abad, Región Uzáyali; 2014*. Pucallpa. Retrieved from <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/2242/000002085T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Magaña, J. L., Torres, E., Martínez, M. T., Sandoval, C., & Hernández, R. (2006). *Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras*. Guanajuato. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/416/41616204/>
- Manobanda, S. D., & Heras, V. A. (2015). *Cuantificación del Metano Utilizando la Técnica de Actividad Metanigénica Específica en Lodos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba*. Universidad de Cuenca, Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21975/1/TESIS.pdf>



- Mladenovska, Z., Hartmann, H., Kvist, T., Sales, C., Gani, R., & Ahring, B. (2006). *Thermal pretreatment of the solid fraction of manure: impact on the biogas reactor performance and microbial community*. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/m/pubmed/16784190/>
- Montes, M. E. (2008). *Estudio Técnico-Económico de la Digestión Anaerobia Conjunta de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y Lodos de Depuradora para la Obtención de Biogás*. Retrieved from http://oa.upm.es/1049/1/MARIA_ESTELA_MONTES_CARMONA.pdf
- Morales, L. A., Morales, V., & Holguín, S. (2016). *Selección de un Biodigestor como Alternativa de Tratamiento a los Residuos Sólidos Orgánicos*. Retrieved from http://revistaelectronica-ipn.org/Contenido/14/TECNOLOGIA_14_000294.pdf
- Navarro, R. (2016, Julio). *Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiesel*. España. Retrieved from ULL: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/2927/OBTENCION%20DE%20BIOGAS%20A%20PARTIR%20DE%20RESIDUOS%20AGRICOLAS%20Y%20DE%20PRODUCCION%20DE%20BIODIESEL.pdf?sequence=1>
- Nguyen, T. (2017). *Temas Ambientales: Protocolo de Kioto*. Retrieved from <http://www.temasambientales.com/2017/03/protocolo-de-kioto.html>
- S.E. (2013). *El Rumen*. Retrieved from <http://www.ugr.es/~cjl/rumen.pdf>
- Santibáñez, C., Varnero, M., & Bustamante, M. (2011). *Residual Glycerol from Biodiesel Manufacturing, Waste or Potential Source of Bioenergy: A Review*. Santiago de Chile. Retrieved from http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-58392011000300019&script=sci_arttext&lng=pt
- Sequinel, R. (2013). *Caracterização físico-química da glicerina proveniente de usinas de biodiesel e determinação de metanol residual por CG com amostragem por Headspace estático*. Retrieved from https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/105816/sequinel_r_dr_araiq.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Siqueira, J. (2012). *Co-digestão de glicerina bruta associada ao estrume bovino na produção de biogás*. Toledo. Retrieved from <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1807/1/Jesse%20Siqueira.pdf>
- Torres, P., & Pérez, A. (2010). *Actividad Metanogénica Específica: Una Herramienta de Control y Optimización de Sistemas de Tratamiento Anaerobio de Agua Residuales*. Cali. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434001.pdf>



- Urgilés, M., & Vázquez, J. (2009). *Implementación de un sistema de colado de baja presión vertical en la fábrica Cerámica Andina*. Universidad de Cuenca, Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/837>
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Vera, D. (2006). *Ecuador, Country Pasture/Forage Resources Profile*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Ecuador/ecuador.htm>
- Villanueva, J. A., Nájera, H., Gómez, J., Hernández, T., & Velasco, A. (2011). *Generación, caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino*. Chiapas. Retrieved from <http://cuid.unicach.mx/revistas/index.php/lacandonia/article/view/258/238>



ANEXOS

Tablas

Tabla 27. Resultados de %Humedad

Muestras	Peso Cápsula (g)	P. M fresca (g)	Peso		%Humedad	
			Cápsula + Muestra seca (g)	Peso Muestra Seca (g)	= (P.M Fresca- P.M Seca)/(P.M Fresca)×100	Promedio (%)
A ₁	138.9945	4.3308	140.2166	1.2221	71.78	
A ₂	117.5113	4.3322	118.7342	1.2229	71.77	71.78
B ₁	138.2010	4.5730	138.7426	0.5416	88	
B ₂	143.8271	4.4670	144.4025	0.5754	87.11	87.5



Tabla 28. Matriz para cálculo de coeficientes

Experimento	I	X1	X2	X3	x1*x2	x1*x3	x2*x3	x1*x2*x3	R1	R2	R3	Promedio	Coeficientes
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	62	59	74	65,0	79,58
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	53	50	51	51,3	-12,92
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	71	73	82	75,3	3,08
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	56	60	53	56,3	17,58
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	107	111	112	110,0	-1,92
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	79	81	79	79,7	-4,75
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	122	119	118	119,7	-0,75
8	1	1	1	1	1	1	1	1	81	79	78	79,3	-0,58