

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE NUTRICION ANIMAL



**GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO
PORCINO DE GRANJA Y CASERO COMPARADO CON OTROS
ESTIÉRCOLES (BOVINO Y AVE)**

POR

MERCEDES SANTOS ANGEL

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el

Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN ZOOTECNIA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Agosto de 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE NUTRICION ANIMAL

GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO PORCINO DE
GRANJA Y CASERO COMPARADO CON OTROS ESTIÉRCOLES (BOVINO Y
AVE)

TESIS

Presentado por:

MERCEDES SANTOS ANGEL

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador, como requisito parcial
para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Zootecnia.

DR. JESÚS M. FUENTES RODRÍGUEZ
PRESIDENTE DEL JURADO

DR. JUAN CARLOS ZUÑIGA ENRIQUEZ
ASESOR PRINCIPAL

DR. RAMIRO LÓPEZ TRUJILLO
ASESOR

DR. RAMIRO LÓPEZ TRUJILLO
COORDINADOR DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Agosto de 2014

AGRADECIMIENTOS

A ti Dios, te doy gracias por haberme permitido llegar felizmente a este día y te pido que con tu luz me guíes y me acompañes siempre a lo largo de mi vida profesional.

A mi “ALMA MATER” gracias por abrirme sus puertas para la adquisición y desarrollo de conocimientos para mi formación profesional.

A MIS ASESORES

AL Dr. Jesús Manuel Fuentes Rodríguez por brindarme su valioso conocimiento para la presente investigación, apoyo incondicional, paciencia y comprensión en todo momento. Muchas gracias.

Al Dr. Juan Carlos Zúñiga Enríquez por brindarme su valioso conocimiento aportado en la presente investigación, por su apoyo incondicional que recibí por medio de sus asesorías para obtener esta obra y por su valiosa amistad. Muchas gracias.

Al Dr. Ramiro López Trujillo gracias por el apoyo, e interés y colaboración para la culminación de este trabajo de investigación. Por su valiosa amistad. Muchas gracias.

Y a todo aquellos que hicieron posible de una u otra manera la realización de esta investigación.

DEDICATORIA

A mis padres:

José Santos Lázaro. Y María Nelly Angel Clemente.

Dedico este trabajo por todo el amor, paciencia, comprensión, confianza, por todos los sacrificios, apoyo moral y económico incondicional, por sus sabios consejos que me permitieron llegar hasta este día tan especial, ya que mis logros son también suyos e inspirados en ustedes. **POR TODO GRACIAS.**

A mis hermanos:

José Alejandro, Patricia, Guadalupe y Candelaria Santos Angel gracias por todo el apoyo moral recibido, los sabios consejo, por apoyarme en todo momento dándome ánimos y por todo su amor incondicional. Gracias.

A mis amigos:

Magda P. Caballero, Cristina Díaz R., Juan C. Rodríguez., Vainey Castillo A., Gabriela Reyes M., Irene Carrasco N., Nazario Villa D., Junior Sánchez R., por brindarme su valiosa amistad, y estar en los momentos de alegría y de tristeza, por los momentos que disfrutamos durante nuestra estancia en la universidad. Gracias.

A mi pareja **Roberto Martínez Jiménez** por brindar todo el amor, cariño, apoyo incondicional, paciencia y comprensión a lo largo de la culminación de esta investigación. Gracias.

A mis abuelitos:

Humberto Angel Gálvez, Matilde Clemente G. Manuel Santos Rodríguez., y a mi abuelita **conchi** donde quiera que estés, por todo los consejos, amor y apoyo incondicional.

Y a todas aquellas personas que comparten este triunfo conmigo.

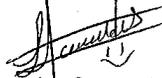
Con mucho cariño, admiración y respeto ..
Mercedes Santos Angel.

MANIFIESTO DE HONESTIDAD ACADEMICA

El suscrito Mercedes Santos Angel, estudiante de la carrera de Ingeniero Agrónomo Zootecnista, con matrícula 293672 y autor de la presente Tesis manifiesto que:

1. Reconozco que el Plagio académico constituye un delito que está penado en nuestro país.
2. Las ideas, opiniones datos e información publicadas por otros autores y utilizadas en la presente Tesis han sido debidamente citadas reconociendo la autoría de la fuente original.
3. Toda la información consultada ha sido analizada e interpretada por la suscrita y redactada según su criterio y apreciación, de tal manera que no se ha incurrido en el "copiado y pegado" de dicha información.
4. Reconozco la responsabilidad sobre los derechos de autor de los materiales bibliográficos consultados por cualquier vía y manifiesto no haber hecho mal uso de ninguno de ellos.
5. Entiendo que la función y alcance de mi Comité de Asesoría, está circunscrito a la orientación y guía respecto a la metodología de la investigación realizada para la presente Tesis, así como del análisis e interpretación de los resultados obtenidos, y por lo tanto eximo de toda responsabilidad relacionado al plagio académico a mi comité de Asesoría y acepto que cualquier responsabilidad al respecto es únicamente por parte mía.

Atentamente



Mercedes Santos Angel

Nombre y Firma
Tesis de Licenciatura UAAAN

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS -----	iii
DEDICATORIA -----	v
INDICE GENERAL -----	vii
INDICE DE CUADROS -----	x
ÍNDICE DE FIGURAS -----	xi
INDICE DE GRAFICAS -----	xii
RESUMEN -----	xiii
1. INTRODUCCIÓN -----	1
1.1. Objetivo General -----	3
1.1.1. Objetivos Específicos-----	3
1.2 Hipótesis: -----	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA -----	4
2.1 Bioenergías -----	4
2.1.1 Ventajas e inconvenientes del aprovechamiento de la biomasa -----	5
2.2. Bioenergías en el mundo -----	6
2.3. Energías de biomasa -----	7
2.3.1. Etanol -----	7
2.3.2. Biodiesel -----	7
2.3.3. Biogás-----	8
2.4. Historia del Biogás -----	8
2.5. El Biogás a Nivel Mundial -----	11
2.6. Biogás en México. -----	12
2.7. Que es el Biogás -----	15
2.8. Obtención de Biogás -----	16
2.9. Características del Biogás -----	17
2.10. Aplicaciones del Biogás -----	19
2.11. Fermentación Anaerobia -----	20
2.11.1. Hidrolisis -----	21
2.11.2. Etapa Fermentativa o Acidogénica -----	22
2.11.3. Etapa Acetogénica -----	22
2.11.4. Etapa Metanogénica-----	23

2.12. Productos Finales de la Fermentación Anaerobia	25
2.12.1. Biogás.....	25
2.12.2. Bioabono.....	25
2.13. Bacterias en la Producción de Biogás	25
2.13.1 Bacterias que participan de la hidrólisis:	25
2.13.2 Bacterias que participan de la acidogénesis.....	26
2.13.3. Bacterias que participan de la acetogénesis.....	26
2.13.4. Bacterias que participan de la metanogénesis.....	26
2.14. Factores en la Producción de Biogás	27
2.14.1. Materias primas:	27
2.14.2. Velocidad de carga volumétrica	28
2.14.3. Tiempo de retención:.....	28
2.14.4. Relación carbono/ nitrógeno:	28
2.14.5. Temperatura:.....	29
2.14.6. pH.....	30
2.14.7. Nutrientes.....	30
2.15. Ventajas y Desventajas del Biogás	31
2.16. Producción de Cerdo en México	32
2.17. Estiércol en México	33
2.18 Rendimiento de biogás a partir de sustratos diversos	36
3. MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1. Localización geográfica	38
3.2. Materiales Utilizados:	38
3.2.1. Material Biológico:	38
3.2.2. Material de Laboratorio	39
3.3. Sistema Baño María	40
3.3.1. Instalación de los Biodigestores.....	40
3.4. Parámetros Evaluados	41
3.4.1. pH de la mezcla.....	42
3.4.2. Volumen de biogás.....	42
3.5. Recolección de Estiércoles	42
3.6. Preparación de las Muestras	43
3.7. Descripción de los Tratamientos	44
3.8. Análisis Estadístico	45
3.8.1. Diseño Estadístico.....	45
3.8.2. DMS (Diferencia Media Significativa).....	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47

4.1. Biogás obtenido en la primera fase -----	47
4.1.1. Efecto del pH en la Producción de Biogás. -----	52
4.2. Resultados Obtenidos en la Segunda Etapa -----	56
4.2.1 Potencial Hidrogeno (pH) en la Producción de Biogás-----	62
5 CONCLUSIONES -----	68
6. RECOMENDACIONES -----	69
7. LITERATURA CITADA -----	70

INDICE DE CUADROS

No.	Cuadro	Número
1	Granja y tipo de biodigestor incorporados a proyecto	14
2	Composición del biogás	17
3	Características del biogás	17
4	Residuos orgánicos de diversos orígenes	25
5	Rangos de temperaturas y tiempos de fermentación	27
6	Inventario de entidades con mayor ganado porcino 1996-2006 (miles de cabeza)	29
7	Producción diaria de excretas producidas según el tipo de cerdo	31
8	Producción de estiércol y biogás en c/ especie animal	
9	Distribución de los tratamientos utilizados en la primera fase	37
10	Descripción de los tratamientos utilizados en la segunda fase	37
11	Descripción de la distribución de los tratamientos en la primera fase	39
12	Análisis de varianza para la evolución de la producción de biogás en 3 tratamientos de materia orgánica	42
13	Resumen de los resultados para producción de biogás para la primera etapa	44
14	Análisis de varianza de la producción de biogás en 4 tipos de estiércoles	50
	Comparación de medias en la producción de biogás	50

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Figura	Número
1	Proceso de la biomasa para bioenergía	5
2	Planta de biogás en Miyun, Beijín	11
3	Ubicación de proyectos de manejo de residuos porcinos acreditados por el COMEGEI.	13
4	Usos del biogás	18
5	Inventario de ganado porcino 2000-2006	30
6	Principales factores que afectan la cantidad y composición de las excretas	32
7	Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la República	33
8	Estiércoles que se encontraron en el laboratorio	35
9	Descripción gráfica del biodigestor	38
10	Tratamientos en el baño María	40
11	Termómetro en el baño María	40
12	Bolsas usadas como recolectoras de biogás	41

INDICE DE GRAFICAS

No.	Grafica	Número
1	Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de Materiales poliméricos.	22
2	Evolución de tres tipos de tratamientos para la producción de biogás.	44
3	Evolución del pH en tres tratamientos para la producción de biogás.	46
4	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo fresco.	47
5	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de gallina.	48
6	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de bovino deshidratado	48
7	Evolución de cuatro tipos de tratamientos para la producción de biogás.	52
8	Tiempo de retención de dos tratamientos.	53
9	Tiempo de retención de los estiércoles de cerdo de granja en fresco y estiércol de bovino lechero fresco.	53
10	Comportamiento del pH en cuatro diferentes tipos de estiércol.	54
11	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo de granja metabólica (fresco).	55
12	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo de granja (fresco).	56
13	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo de granja deshidratado.	56
14	Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de bovino lechero fresco.	57

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo el estudio de la fermentación anaeróbica de excretas de gallina, cerdos y bovinos para la producción de biogás en dos fases de estudio. Los parámetros evaluados fueron: pH y volumen de producción de biogás. Las diferentes excretas utilizadas en esta investigación se encontraban en diferentes estados ya sea fresca o seca, las cuales se colocaron en un bioreactor.

Los bioreactores fueron Matraces Erlenmeyer que se adaptaron para este propósito, los cuales se sumergieron a un baño María, integrado por dos calentadores eléctricos y un termómetro para control de temperatura en el baño María.

Los resultados mostraron que para la primera fase de la investigación, las materias orgánicas con mayor producción de biogás fueron la gallinaza deshidratada y el estiércol de cerdo de granja fresco, con una producción de 1.90 y 0.84 litros respectivamente en un periodo de siete días. El estiércol de bovino de leche produjo 0.66 litros en el mismo periodo.

Para la segunda fase la mejor materia orgánica en la producción de biogás fue el estiércol de cerdo de granja fresco, con una producción de 1.46 litros, en relación con los otros tipos de estiércoles de cerdo como es el de traspatio (Unidad Metabólica) con una producción de 0.25 litros en el mismo periodo, debido al tipo de alimentación que tiene esta especie se ve reflejado en la producción de biogás.

Los resultados obtenidos en esta investigación indican que el pH no influye en la producción de biogás, sin embargo, la literatura menciona que el proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH, lo cual se atribuye al reducido periodo que abarcó el estudio, no permitiendo una adecuada estabilización del proceso. Lo encontrado debe ser estudiado con mayor detalle con el propósito de conocer mejor los factores que inciden en esta

relación, lo que permitirá un mejor manejo de los mismos y una mejor y mayor producción de biogás.

En este estudio se concluye que la mejor materia orgánica a utilizar para la producción de biogás sería la de ave, ya que supero en producción a las demás materias orgánicas evaluadas en este experimento. Como segunda opción se tendría a la excreta de cerdo de granja fresco para la producción de biogás.

Palabras claves: fermentación anaerobia, biogás, estiércoles, gallinaza, pH.

1. INTRODUCCIÓN

El mayor problema que enfrentan las explotaciones porcinas es la generación de excretas, ya que contaminan el ambiente y pueden llegar a constituirse en el principal obstáculo para el futuro desarrollo de la industria animal. Las excretas de cerdo se han manejado tradicionalmente en un sistema cerdos-pasto, aprovechando el mejoramiento de los suelos para pastos con la fertilización de materia orgánica Castrillón et al., (2013).

Los animales en las granjas generan emisiones de productos contaminantes como son: metano y dióxido de carbono, debido al mal manejo de sus excretas, lo que genera problemas de desequilibrio físico, químico y biológico en las tierras de cultivo, y en el peor de los casos pueden tener un alcance hacia caudales o mantos acuíferos provocando la eutrofización.

De La Guerra (2011), cita que actualmente la industria depende principalmente de combustibles fósiles para la generación de energía, pero estos al ser procesados provocan daño ambiental, y al no ser renovables resultan cada vez más escasos y por lo tanto costosos, es aquí donde las fuentes de energía renovables cobran cada vez más importancia, ya que se pueden utilizar para la generación de energía eléctrica, ayudan a disminuir la dependencia de hidrocarburos fósiles y permiten contribuir a la protección del medio ambiente.

En su manual para la producción de biogás Hilbert (2013), indica que la fermentación anaeróbica es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. De esta forma se puede encontrar el denominado "gas de los pantanos" que brota en aguas estancadas, el gas natural metano de los yacimientos petrolíferos, así como el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes como el bovino, y con este proceso se genera energía renovable, mediante el proceso biológico natural.

De acuerdo con Gutiérrez (1995) en México, el manejo de los desechos de las granjas de cerdos, continua siendo uno de los problemas fundamentales, debido a que son difíciles de manejarlos, por ello se ha determinado la necesidad de buscar alternativas para reducirlo.

En México actualmente existen granjas sustentables, donde aprovechan los desechos (excretas), para la generación de biocombustible (De La Guerra, 2011).

Las granjas que cuentan con generadores de biogás son:

- Grupo Agrícola Vigo, ubicada en Torreón, Coahuila, con 2000 vacas en producción.
- Grupo Agrícola los Lujan, ubicada en Delicias, Chihuahua, cuanta con 8000 vacas en producción.
- En Valle del Yaqui, Sonora, esta granja genera 600 m³/d de agua residual. La laguna anaerobia de 6800 m³ está instalada en la granja porcina con capacidad de 6000 cerdos es utilizada para tratar el agua residual generada. La laguna se encuentra herméticamente cubierta con plástico a fin de colectar el biogás producido. El agua residual es tratada anaerobiamente.
- Granja Porcina Ana Margarita, ubicada en Montemorelos, Nuevo León, con 1200 vientres, en el cual se tiene un biodigestor con una producción de 20478 m³.

Chávez (2012), menciona que en el año 2011 se creó la Coalición de Cambio Climático y Aire Limpio, para abocarse a atender la reducción, mitigación o eliminación de gases de vida corta que tienen gran impacto sobre el cambio climático y en la contaminación del aire. México, Bangladesh, Canadá, Estados Unidos, Ghana y Suecia fueron los países fundadores de esta iniciativa, que en un año pasó a contar con 19 países miembros (entre ellos Alemania, Colombia, Dinamarca, Francia, Holanda, Italia, Japón, Noruega, Reino Unido, Rusia).

Los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas contribuyen de manera importante al calentamiento del planeta, que constituye un riesgo múltiple para la agricultura y otras actividades humanas, además los expertos afirman que las reservas fósiles duraran otros 40 o 50 años, por todo esto se buscan fuentes sustitutas de energía (www.oni.escuelas.edu (2013)).

1.1. Objetivo General

- Cuantificar la producción de biogás mediante una fermentación anaerobia, utilizando estiércol de cerdo de granja y traspatio, bovino y aviar.

1.1.1. Objetivos Específicos

- Medir la producción de biogás en estiércol de cerdo de granja y de traspatio, bovino y aviar.
- Identificar cuál de los estiércoles de cerdo granja o traspatio, bovino ya aviar tiene la mejor producción de biogás.
- Determinar si el pH tiene relación con la producción del biogás.

1.2 Hipótesis:

Ha1: La producción de biogás en estiércol de cerdo ya sea granja o traspatio es superior a la producción de biogás utilizando excretas de bovino y aviares.

Ha2: La producción de biogás obtenida de los estiércoles de cerdo de granja y traspatio, son diferentes en cuanto a la cantidad de biogás generado comparada con las de bovino y aviares.

Ha3: El pH influye en la producción de biogás en los estiércoles estudiados.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Bioenergías

FIRCO-SAGARPA (2007), menciona que los bioenergéticos son combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domesticas, comerciales, industriales de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos por procesos tecnológicos sustentables (Fig.1), que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

Biomasa: Materia orgánica obtenida de productos y residuos animales y vegetales, utilizable como fuente de energía.

Energías renovables o alternativas: Son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica.

Sistemas de Biodigestión: Son sistemas para el aprovechamiento de las excretas generadas en las unidades lecheras, porcinas o agroindustriales para la generación de biogás.



Figura. No.1 Proceso de la biomasa para la generación de bioenergía.

Fuente: Monroy (2013).

2.1.1 Ventajas e inconvenientes del aprovechamiento de la biomasa

De acuerdo con Monroy (2011) las ventajas que representan el aprovechamiento energético de la biomasa resultan evidentes y son las siguientes:

- Soluciona los problemas que acarrea la destrucción incontrolada de los residuos, evitando la contaminación medioambiental (malos olores, humos. etc.).
- Disminuye el riesgo de incendios en los bosques.
- Su uso significa una reducción en el consumo de otras fuentes de energía no renovables, tales como el carbón o el petróleo.

Pero existen también inconvenientes, que hacen que este aprovechamiento se encuentre bastante limitado:

- Se corre el riesgo de que, por una falta de control, se lleven a cabo talas excesivas que agoten la masa vegetal de una zona.
- La biomasa acuática resulta sumamente difícil de aprovechar.

- El proceso de aprovechamiento de la biomasa requiere la utilización de energía de otro tipo, lo que se traduce en un rendimiento neto muy pequeño.
- El alto grado de dispersión de la biomasa da lugar a que su aprovechamiento no resulte, en ocasiones, económicamente rentable.
- El proceso de combustión de la biomasa genera dióxido de carbono, responsable principal del efecto invernadero.

2.2. Bioenergías en el mundo

ONU-energías (2007), cita que las tecnologías modernas de la bioenergía que producen combustibles para calefacción, electricidad y transporte están avanzando rápidamente, con mucho del reciente interés centrado en los biocombustibles líquidos, en particular el etanol y el biodiesel. Actualmente, Estados Unidos y Brasil dominan la industria de combustibles líquidos, pero muchos otros gobiernos están considerando activamente hoy en día el papel adecuado de los biocombustibles en sus futuras agendas energéticas.

En la misma cita, menciona que la bioenergía moderna también puede ayudar a satisfacer las necesidades de los 1.600 millones de personas en el mundo que no tienen acceso a electricidad en sus hogares, y los 2.400 millones que dependen de la paja, del estiércol, y de otros combustibles de biomasa para satisfacer sus necesidades energéticas. La bioenergía producida localmente puede proporcionar energía para uso local, agrícola, industrial y en los hogares, en algunos casos a menor costo que los combustibles fósiles. El rápido desarrollo de la bioenergía moderna en el mundo presenta claramente un amplio rango de oportunidades, pero también acarrea muchas desventajas y riesgos. La experiencia en cuanto a los impactos sociales, económicos y ambientales asociados es limitada, y los tipos de impacto dependerán ampliamente de las condiciones locales y de los marcos de trabajo de las políticas implementadas para apoyar el desarrollo de la bioenergía. La política agrícola, incluyendo la disponibilidad de infraestructura agrícola.

También se menciona a la bioenergía moderna como una solución para la falta de servicios energéticos por parte de los pobres encaja en un contexto que incluye muchas soluciones como esta: GPL (Gas Petróleo Líquido) y sistemas solares al igual que el microhidro y la energía eólica, por nombrar algunos.

2.3. Energías de biomasa

2.3.1. Etanol

El etanol conocido como alcohol etílico, es un alcohol que se presenta como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78 °C. Al mezclarse con agua en cualquier proporción.

Es producido por la fermentación de plantas de azúcar, maíz y otros productos de grano, en Latinoamérica principalmente de caña de azúcar. Para su uso comercial e industrial, siempre es desnaturalizado (es decir, se le adicionan pequeñas cantidades de sustancias nocivas) para evitar su mal uso como bebida alcohólica. Su uso más sobresaliente y frecuente es como un aditivo para la gasolina común usando un 10% de ETANOL ("gasohol") que es lo más recomendado Sousa (2009).

2.3.2. Biodiesel

CONAE (2007), cita que el biodiesel es un combustible renovable que se puede obtener principalmente a partir de aceites vegetales, animales, así como de aceites reciclados.

El biodiesel tiene una ventaja ecológica, en comparación con el diesel de origen fósil, ya que reduce las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero. Así, por ejemplo, el uso de una tonelada de Biodiesel, evita la producción de 2.5 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) y sobre todo elimina si se usa el biodiesel sólo en los motores, las emisiones de azufre (SO₂) del diesel,

evitando las lluvias ácidas; además, lo que es fundamental: es un combustible renovable y no finito como los hidrocarburos.

2.3.3. Biogás

FIRCO-SAGARPA (2007), menciona que el biogás es producido por bacterias en el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas, es decir, sin oxígeno. Es una mezcla de gases en donde predomina el metano y el dióxido de carbono. El metano, que es el último eslabón de este proceso, es un gas inflamable, que es el producto útil de este proceso y que mediante una sencilla adaptación puede ser utilizado en cualquier cocina o calefactor.

2.4. Historia del Biogás

Deublein y Steinhauer (2008), citados por Lobera (2011), mencionan que la historia del biogás comienza hace unos 5000 años atrás. Fuentes muy antiguas dicen que el uso de los desechos y los “recursos renovables” para el suministro de energía no son conceptos nuevos, pues ya eran conocidos y utilizados mucho antes del nacimiento de Cristo. Los inicios del biogás se han fijado en base a hechos históricos que dicen que, alrededor de 3000 años antes de Cristo, los sumerios ya practicaban la limpieza anaerobia de los residuos

Los mismos autores también citan, que hay datos basados en el relato del viaje de Marco Polo a China, en el libro “Divisament du monde” (posteriormente conocido como “El Libro de las maravillas del mundo”), en el que se describen unos tanques cubiertos en donde se almacenaban las aguas residuales en la antigua China, pero no está claro si capturaban el gas o si le daban alguna utilidad, en este libro se dice que este hecho, está mencionado en la literatura china del tercer milenio antes de Cristo. También hay otras fuentes que citan como primer uso del biogás el calentamiento del agua de los baños públicos en Asiria, allá por el siglo X aC.

En 1804, John Dalton describe la estructura química del metano y lo asocia con el biogás. En 1806, William Henry dedujo la identidad probable del gas de los pantanos. En 1808 Humphry Davy, químico inglés, produce gas metano en un laboratorio con estiércol de ganado. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás. Labor que continua, en parte, su alumno y luego célebre físico inglés Faraday (nacido en el condado de Surrey), realizando algunos experimentos con el gas de los pantanos y el hidrocarburo identificado como parte de él.

A la vez, mencionan también que en la segunda mitad del siglo XIX, se comenzó en Francia una investigación en profundidad, más sistemática y científica para comprender mejor el proceso de la fermentación anaerobia. El objetivo era simplemente suprimir el mal olor emitido por los conjuntos de aguas residuales. Durante sus experimentos, los investigadores descubrieron algunos de los microorganismos que hoy se conocen como esenciales para el proceso de fermentación.

En 1856, Reiset encontró que el CH_4 se libera al descomponer el estiércol amontonado y propuso que este proceso se estudiara para ayudar a explicar la descomposición del material orgánico en general. El científico ruso Omelianski, en 1886, realizó la comprobación de la formación de metano con el estiércol de vaca.

Hilbert (2013), establece que en el año 1890 se construyó el primer biodigestor a escala real en la India y ya en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad.

Barker (1956). Citado por Lobera (2011), menciona que a finales del siglo XIX fue demostrada la presencia de microorganismos involucrados en el proceso de fermentación metánica. En estos finales del siglo XIX se construyen en el sur de China las primeras plantas de biogás, tal y como se conocen actualmente.

Lobera (2011), menciona que con motivo de la II Guerra Mundial se desarrollaron en Alemania un gran número de instalaciones de digestión anaerobia con el fin de potenciar nuevas fuentes de energía, y aunque la tecnología se extendió al resto de Europa Occidental, cuando cesaron las condiciones de escasez de combustibles sólo quedaron funcionando algunos pocos digestores en Alemania y Francia. Alrededor de los años cuarenta del siglo pasado, en los Estados Unidos, se emplea el término de “digestión anaeróbica” como una parte del tratamiento de las aguas residuales, generando metano que es utilizado para producir electricidad para las propias plantas de depuración. Cita también, que después de la II Guerra Mundial se construyeron cerca de 40 digestores, en Europa, pero su desarrollo se frenó por los bajos precios de los combustibles fósiles. Después de esta Gran Guerra la generación de biogás se extendió y se desarrolló en diversos países, tales como: Sudáfrica, Rodesia, Kenia, Uganda, Rusia, Australia, Italia, Corea, Taiwán, Japón, Israel, Estados Unidos, India y Filipinas.

Pfeffer, (1974) y Smill, (1974), citados por Lobera (2011), enuncian por separado que para los años 70 es cuando se impulsan las construcciones de biodigestores, mediante programas de ámbito nacional. Para 1977 en China había más de 5 millones de digestores anaerobios, esto por la mayor economía de los materiales empleados, ya que se reducían los costos de inversión.

En la misma cita menciona que en 1984, se construyó la primera planta centralizada de biogás en Dinamarca., y se comenzó un ambicioso proyecto de demostración desarrollado conjuntamente por el Ministerio de Agricultura y el de Medioambiente danés, en un esfuerzo por demostrar el potencial de las grandes plantas como productoras de energía eléctrica. Con la nueva legislación eléctrica de los años 90, en Alemania, se produjo una nueva oleada de construcción de digestores, que todavía se mantiene gracias al pago por kW/h producido, que es mejorada con la nueva ley de energías renovables. De hecho, al final de los años noventa del pasado siglo, se construyeron y se implementaron numerosas plantas para el tratamiento mecánico-biológico de las basuras. La tecnología estaba

basada en procesos anaerobios con algún compostaje aerobio. El proceso anaerobio demostró ser ventajoso ya que permitió proporcionar bastante energía para la propia planta.

2.5. El Biogás a Nivel Mundial

El desafío energético mundial se complica aún más con otro factor importante: los contaminantes y las emisiones de bióxido de carbono resultante del uso de energía. Aunque se ha progresado en reducir las emisiones de contaminantes de los automóviles y camiones así como de fábricas, hogares y otras fuentes, al final harán falta métodos energéticos nuevos para lograr la reducción de emisiones (Ávila, 2009).

También menciona que en la actualidad se ha incrementado el número de investigaciones sobre el desarrollo y despliegue de tecnologías de biomasa, geotérmica, solar, eólica y otras energías renovables y energéticamente eficientes para proveer abastecimiento de energía confiable, costeable y ambientalmente segura para el futuro mundial. En este sentido se toma de base la experiencia de los países como Brasil, España, Unión Soviética y Estados Unidos, en la que la inversión en investigación sobre nuevas energías, han sido por medio de la cooperación y asociación de países industrializados que están comenzando a dar resultados con mejoras espectaculares y continuas en el costo y eficiencias en estas tecnologías; sin embargo aún queda mucho que hacer para satisfacer los desafíos energéticos actuales y futuros.

En Europa se tiene un gran desarrollo en países como Alemania, Austria, Dinamarca y Suecia. En Asia, son China, India, Nepal y Vietnam. En América: Brasil, Cuba, Canadá, E.E.U.U., Chile, etc., tienen grandes aplicaciones en materia de biogás. En países como Suecia, Suiza y Alemania se utiliza biogás para vehículos de transporte, y se cuenta para este propósito con una red de estaciones de gas. En Alemania y Australia se introduce biogás, conocido como bio- metano a la red de gas natural. Los países generadores de tecnología

anaerobia, con mayor desarrollo en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, E.E.U.U., Filipinas y Alemania.

También menciona que China es actualmente uno de los países líderes en producción de biogás. La mayor parte de los digestores instalados es para uso rural a nivel familiar, pero existen empresas especializadas en China que desarrollan proyectos en gran escala para la industria. La planta de biogás en Puxin, cuenta con una capacidad para 200 m³ diseñada para tratar residuos de 1000 cerdos de una granja en Beijíng, el biogás proporciona combustible para 100 familias en el campo para uso doméstico.



Figura No.2. Planta de biogás en Miyun, Beijing.

Fuente: De la Guerra (2011).

2.6. Biogás en México

Guzmán (2011), cita que en la actualidad en México, entre la población existe muy poca información sobre las fuentes de energías alternas, ya que no existe una divulgación masiva por parte de las dependencias públicas, la producción de biogás en la escala casera es una de las vías más redituables para

resolver el problema que afecta en su mayoría a las áreas rurales, no solo en México sino a nivel Latinoamericano.

También dice que en diferentes estudios realizados demuestran que la generación de biogás es una opción tecnológica real de seguridad energética para México. Además este recurso natural tiene grandes ventajas competitivas respecto a otros energéticos en cuanto a preservación de medio ambiente, además de ser económicamente factible para los sectores de bajos y medianos ingresos de la población rural en México.

El problema en México, para poner en marcha tecnologías como la del biogás que benefician a las sociedades rurales se sitúa en la parte metodológica, no existen formas de divulgación y capacitación adaptadas o instauradas en la dialéctica de las identidades que se encuentran presente en nuestro país, debido a la poca importancia que se le ha puesto a los procesos de desarrollo y más aun refiriéndose a desarrollo sustentable.

De la Guerra (2011) menciona que en México, el Comité Mexicano para proyectos de reducción de emisiones y captura de gases de efecto invernadero (COMEGEI) se encarga de promover y aprobar proyectos de reducción de emisiones de GEI. Hasta a mediados de octubre de 2007 la cartera de proyectos relacionados con el manejo de residuos en granjas porcinas, era de un total de 88 ubicados en los Estados que se muestran en la figura 3.



Figura. No. 3. Ubicación de proyectos de manejo de residuos porcinos acreditados por el COMEGEI.

Fuente: De la Guerra 2011.

FIRCO- SAGARPA (2007), indican que la potencialidad del biogás es más importante en las granjas porcinas, establos lecheros y rastros. Esto es así, porque cuentan con un manejo sistemático de las excretas y desechos, que son una fuente abundante de materia prima y que es necesario tratarlos para evitar impactos ambientales. Los grandes volúmenes producidos de excretas y desechos posibilitan que mediante los procesos de Biodigestión y producción de biogás, se genere calor y energía eléctrica.

En los tres casos, granjas porcinas, establos lecheros y rastros, la solución a los problemas ambientales y de salud pública provocada por el manejo de los desechos, es parte fundamental en las preferencias de los demandantes de los sistemas de biogás. Tanto las granjas porcinas tecnificadas, como los establos de sistemas de producción especializados, son unidades productivas que prevén una demanda para el establecimiento de sistemas de biogás integrales y que lo posibiliten dada su capacidad económica de realizar proyectos de este tipo.

En este tipo de sistemas, la producción de energía eléctrica, a través de sistemas de biogás, puede ser aprovechado en la maquinaria y equipo utilizado en los procesos productivos.

En la misma cita, menciona que la empresa **Agcert**, quién a través de los Mecanismos de Desarrollo Limpio ha instrumentado diversos proyectos de mitigación del cambio climático en nuestro país, relacionados con el aprovechamiento de biogás. Estos proyectos se relacionan con al aprovechamiento de desechos orgánicos para limitar la emisión de gases de efecto invernadero.

Cuadro. No.1 Granja y tipo de biodigestor incorporados al proyecto. Fuente: SAGARPA-FIRCO, (2007).

Unidad Productiva	Características Generales del Biodigestor	Características generales de la granja
Granja el Mirasol, Capilla de Gpe., Tepatitlán, Jal.	Dimensión: 35.00 X 80.00 X 5.0 mts. Capacidad: 14,000 m ³ Capacidad de producción de biogás 5,300 m ³ al día	12,000 cerdos al destete Consumo de energía eléctrica: 18,000 kWh
Avicar de Occidente S.A. de C.V., Tepatitlán, Jal.	Dimensión: 45.00 X 35.00 X 4.0 mts. Capacidad: 6,300 m ³ Capacidad de producción de biogás 611 m ³ al día	5,200 cerdos Consumo de energía eléctrica: 71,824 kWh
Granja Ana Margarita, Montemorelos, N.L.	Dimensión: 82.20 X 49.40 X 7.0 mts. Capacidad del biodigestor: 8,516 m ³ Capacidad de producción de biogás: 20,478 m ³ al día	11,200 cerdos (proceso de gestación, crianza, desarrollo y finalización) Consumo de energía eléctrica: 40,000 kWh
Granja El Chanco, Montemorelos, N.L.	Dimensión: 62.23 X 43.40 X 7.0 mts. Capacidad del biodigestor: 4,626 m ³ Capacidad de producción de biogás: 13,046 m ³ al día	4,500 cerdos (proceso de gestación, crianza, desarrollo y finalización) Consumo de energía eléctrica: 13,000 kWh
Granja La Prietita, Caderyta, N.L.	Dimensión: 47.39 X 39.00 X 7.0 mts. Capacidad del biodigestor: 3,750 m ³ Capacidad de producción de biogás: 300 m ³ al día	5,000 cerdos (proceso de gestación, crianza, desarrollo y finalización) Consumo de energía eléctrica: 19,000 kWh
Granja San Carlos 3, Hermosillo, Son.	Dimensión: 81.68 X 62.60 X 4.0 mts. Capacidad del biodigestor: 8,069 m ³ Capacidad de producción de biogás: 1,121 m ³ al día	7,440 cerdos (procesos de gestación, crianza, desarrollo y finalización) Consumo de energía eléctrica: 90,720 kWh
Granja Santa Fé / Sacramento	Dimensión: 132.13 X 53.78 X 7.0 mts. Capacidad del biodigestor: 16,066 m ³ Capacidad de producción de biogás: 1,550 m ³ al día	15,157 cerdos (procesos de gestación, crianza, desarrollo y finalización) Consumo de energía eléctrica: 38,880 kWh
Granja Las Palomas, Cd. Obregón, Son.	Dimensión: 63.09 X 32.61 X 6.71 mts. Capacida del biodigestor: 7,580 m ³ Capacidad de producción de biogás: 1,300 m ³ al día	13,550 cerdos (proceso de criza – finalización) Consumo de energía eléctrica:
Granja Lolita, Navojoa, Son	Dimensión: 67.00 X 69.71 X 6.50 mts. Capacida: del biodigestor: 13,514m ³ Capacidad de producción de biogás 1,184 m ³ al día	2,200 vientres (17,300 cabezas) Consumo de energía eléctrica: 50,000 kWh

2.7. Que es el Biogás

Varnero (2011), menciona, que el biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable.

Ávila (2009), menciona, que el biogás es un gas que consiste principalmente en el gas metano (55%-65%), producido por la digestión anaerobia (en la ausencia de oxígeno molecular) de materia orgánica.

Este gas se conoce por varios nombres, dependiendo donde se forma, dado que la digestión anaerobia es muy frecuente en los humedales se le pone el nombre de gas de pantano o gas de swampo. Sin embargo, no importa donde se forme, todo biogás se produce con las mismas reacciones químicas para tener casi la misma composición gaseosa.

Wayllas (2010), dice, que el gas producido es una mezcla que contiene del 65- 70 % de metano, 30-35% de anhídrido carbónico, trazas de ácido sulfúrico, pequeños porcentajes de H_2CO e hidrocarburos saturados y un potencial energético de 5300-5800 Kcal/m³ de biogás. El biogás es un combustible que arde bien y no desprende humo como el carbón o la leña.

2.8. Obtención de Biogás

Varnero (2011) cita que en una fermentación anaeróbica, la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es

parcialmente oxidado y por lo tanto, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva.

Es importante destacar que la mayor parte (dos tercios) del metano se produce mediante fermentación anaeróbica en el cual el acetato actúa como dador y aceptor de electrones. La producción de metano mediante esta vía se conoce comúnmente como metanogénesis acetotrófica. La fermentación anaeróbica se puede aplicar para la recuperación de biocombustibles (e.g. hidrógeno y butanol) y productos bioquímicos (nisina y ácido láctico).

La respiración anaeróbica es un proceso biológico de óxido-reducción de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor terminal de electrones es una molécula inorgánica distinta del oxígeno, y más raramente una molécula orgánica. La realizan exclusivamente algunos grupos de bacterias y para ello utilizan una cadena transportadora de electrones análoga a la de las mitocondria en la respiración aeróbica. No debe confundirse con la fermentación, que es un proceso también anaeróbico, pero en el que no participa nada parecido a una cadena transportadora de electrones y el aceptor final de electrones es siempre una molécula orgánica. La respiración anaeróbica requiere aceptores de electrones externos para la disposición de los electrones liberados durante la degradación de la materia orgánica. Los aceptores de electrones en este caso pueden ser CO_2 , SO_4^{2-} o NO_3 . La energía liberada es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica.

Cuando el CO_2 acepta los electrones liberados por la materia orgánica, se reduce a gas metano (CH_4). La producción de CH_4 mediante esta vía se conoce como metanogénesis hidrogenotrófica y es responsable de un tercio de la producción total de metano.

2.9. Características del Biogás

Ávila (2009), menciona que así como cualquier gas puro, las propiedades y características del biogás dependen de la presión y la temperatura. El valor calorífico del biogás corresponde aproximadamente a la mitad de un litro de combustible de diesel, el valor calorífico neto depende de la eficiencia de los quemadores o de su aplicación.

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. El biogás tiene propiedades y características que se indican en el cuadro No. 2 y No.3 Varnero (2011).

Cuadro. No. 2. Composición del biogás

Componente	Símbolo	Porcentaje
Metano	CH₄	54 - 70
Dióxido de Carbono	CO₂	27 - 45
Nitrógeno	N₂	0.3 - 3
Hidrógeno	H₂	0 – 1.0
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O₂	0.1
Sulfuro de Hidrógeno	H₂S	Trazas

Fuente: Varnero 2007

Cuadro No. 3. Características del biogás

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein y Steinhauser (2008)

2.10. Aplicaciones del Biogás

Varnero (2011), menciona que existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos, el cual se ilustra en la figura No.4.

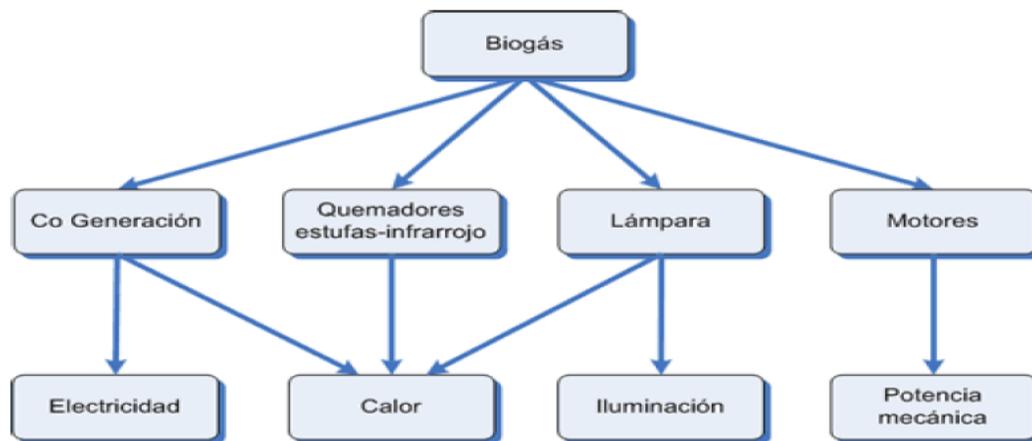


Figura. No. 4. Usos del biogás

Fuente: Energías renovables para el desarrollo sustentable en México, Secretaria de Energía, México, 2006, pag. 23.

- El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). En aquellos lugares donde los combustibles son escasos, los

sistemas pequeños de biogás pueden proporcionar la energía calórica para actividades básicas como cocinar y calentar agua. Los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación.

- Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H₂S (bajo 100 ppm) y vapor de agua.
- El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Para esto, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural, para usarse en vehículos que se han acondicionado para el funcionamiento con gas natural. La mayoría de vehículos de esta categoría han sido equipados con un tanque de gas y un sistema de suministro de gas, además del sistema de gasolina normal de combustible.

2.11. Fermentación Anaerobia

Varnero (2011) cita que en una fermentación anaeróbica, la materia orgánica es catabolizada en ausencia de un aceptor de electrones externo mediante microorganismos anaeróbicos estrictos o facultativos a través de reacciones de oxidación-reducción bajo condiciones de oscuridad. El producto generado durante el proceso acepta los electrones liberados durante la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la materia orgánica actúa como dador y aceptor de electrones. En la fermentación, el sustrato es parcialmente oxidado y por lo tanto, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva.

La misma cita menciona, que la digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de

estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica.

2.11.1. Hidrolisis

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de digestión anaeróbica debido a que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaeróbicos comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis. Esto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiasa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos. La tasa de hidrólisis, en general, aumenta con la

temperatura. La tasa de hidrólisis depende, también, del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pre tratamientos físico-químicos, cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis, y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactor menores.

2.11.2. Etapa Fermentativa o Acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H_2) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

2.11.3. Etapa Acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H_2/CO_2) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*.

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

2.11.4. Etapa Metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H_2/CO_2 y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H_2 como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotrix*. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

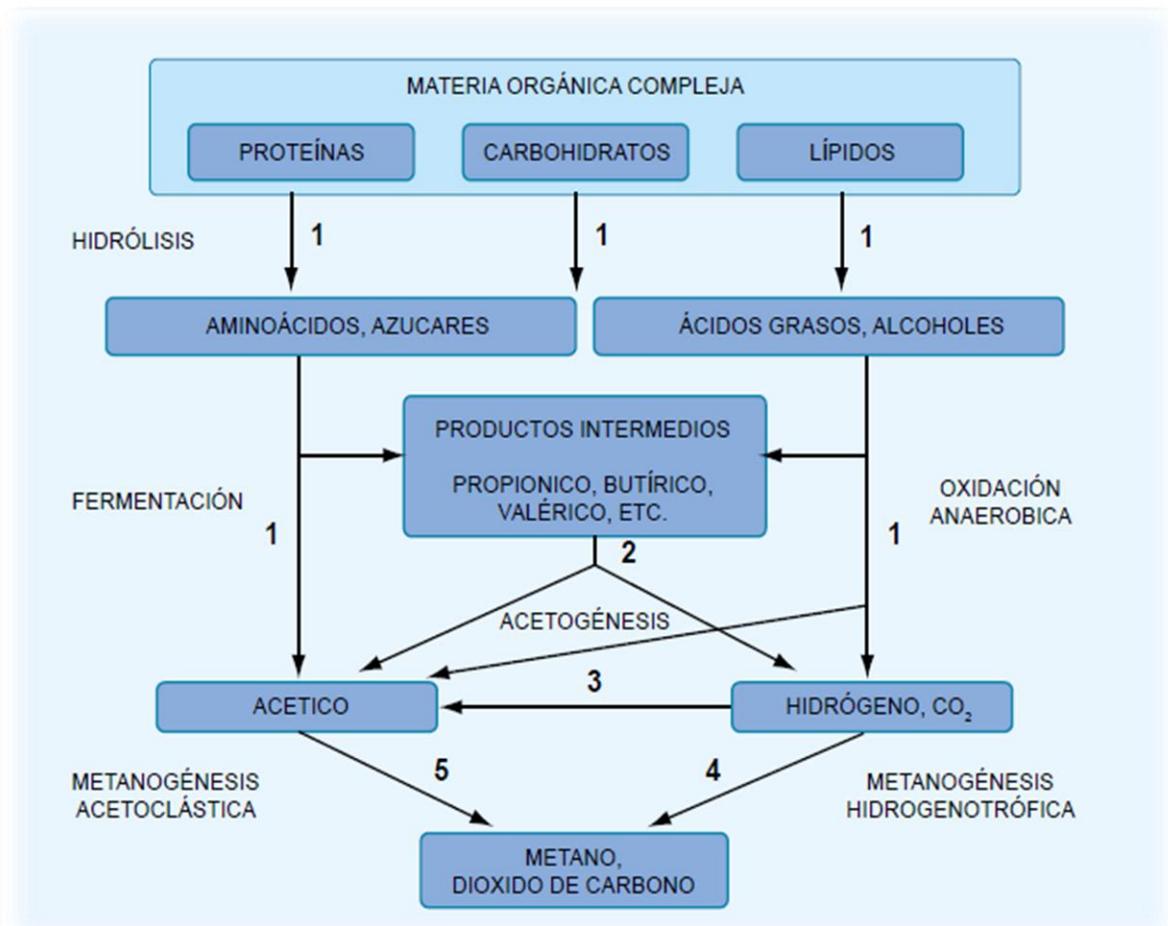


Figura No.5. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos. Fuente: (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991). Los

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

La misma cita menciona que los principales productos del proceso de digestión anaerobia, en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un bioabono que consiste en un efluente estabilizado.

2.12. Productos Finales de la Fermentación Anaerobia

2.12.1. Biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable.

2.12.2. Bioabono

Las características del bioabono, dependen en gran medida del tipo de tecnología y de las materias primas utilizadas para la digestión. Durante el proceso anaeróbico, parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor al de las materias primas. Gran parte de la materia orgánica de este producto se ha mineralizado, por lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.

2.13. Bacterias en la Producción de Biogás

2.13.1 Bacterias que participan de la hidrólisis:

Los microorganismos de muchos géneros son los responsables de la hidrólisis. Entre estos destacan: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propioni- bacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*.

2.13.2 Bacterias que participan de la acidogénesis.

La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan de la hidrólisis. El género *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus* están presentes en todas las fases del proceso de fermentación, pero son dominantes en la fase acidogénica. El grupo *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides* representa el segundo grupo más grande de microorganismos durante las dos primeras fases de la descomposición. Sin embargo, en la fase metanogénica representan menos del 5% del total de microorganismos. Esto indica que estos grupos son los principales responsables de la degradación de compuestos monoméricos.

2.13.3. Bacterias que participan de la acetogénesis.

Estas bacterias sólo pueden sobrevivir en simbiosis con el género que consume hidrógeno. Todos los microorganismos acetogénicos tienen un período de regeneración de hasta 84 h. Las bacterias acetogénicas reductoras de sulfato son capaces de degradar lactato y etanol, pero no son capaces de degradar ácidos grasos y compuestos aromáticos.

2.13.4. Bacterias que participan de la metanogénesis

La última fase de la descomposición anaeróbica se encuentra dominada por un grupo especial de microorganismos, las Arqueas metanogénicas. Estas se caracterizan a través del co-factor F420, el cual actúa en presencia de hidrogenasas como transportador de H₂. Este puede detectarse por su autofluorescencia en un microscopio óptico.

Las metanogénicas activas aparecen en la segunda fase de la fermentación, la fase acidogénica. Sin embargo, obviamente el número de Arqueas metanogénicas aumenta en la fase metanogénica. Las principales especies están representadas por *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii*, y *Methanosarcina*.

2.14. Factores en la Producción de Biogás

Varnero (2011), menciona los factores que determinan la producción de biogás los cuales son:

2.14.1. Materias primas:

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros.

Cuadro No.4 Residuos orgánicos de diversos orígenes

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 y Arellano, 1991.

Las características bioquímicas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en

proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

2.14.2. Velocidad de carga volumétrica

Volumen de sustratos orgánicos cargado diariamente al digestor. Este tiene una relación de tipo inverso con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.

2.14.3. Tiempo de retención:

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás. Si se toma como ejemplo típico el uso de estiércol de ganado, los TRH varían con la temperatura media de cada región, con la variación diaria estacional.

Hillbert (2013), cita que la selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material. Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

2.14.4. Relación carbono/ nitrógeno:

Varnero (2011), cita que prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

2.14.5. Temperatura:

Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura.

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

Cuadro. No.5 Rangos de temperatura y tiempo de fermentación

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente: Lagrange, 1979.

2.14.6. pH

Varnero (2011), menciona que el proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH (que se encuentran fuera del rango óptimo). Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en el digester no sólo determina la producción de biogás sino también su composición.

En los procesos anaeróbicos, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o por la excesiva acumulación de dióxido de carbono. Una de las primeras opciones para resolver el problema es reducir la tasa de carga orgánica volumétrica, hasta el punto en el cual los AGV se consuman más rápido de lo que se generan. Una vez que el exceso de AGV se ha agotado, el pH del sistema retorna a los rangos de operación normales y la metanogénesis comienza a repuntar. (McCarty,1964, citado por Rocchi, 2012.)

2.14.7. Nutrientes

Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de los procesos de digestión anaeróbica, frente a los procesos aeróbicos, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaeróbicos.

Además del nitrógeno y el fósforo, se han identificado otros diversos nutrientes trazas como esenciales para los microorganismos anaeróbicos. Los metales traza tales como hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro a niveles de mg /L y la vitamina B12 en niveles de µg/L , se ha encontrado que mejoran la producción de metano.

Algunos de los metales traza y sus roles en el proceso anaeróbico se discuten a continuación:

Níquel: el Ni es particularmente importante para los metanogénicos debido a que es un constituyente estructural del factor F430, el cual se encuentra exclusivamente en las bacterias metanogénicas.

Cobalto: El Co es importante debido a que también es un constituyente estructural de la vitamina B12, la cual cataliza la metanogénesis. El níquel, cobalto y otros minerales traza son esenciales para la degradación del metanol en un reactor bajo condiciones mesofílicas.

2.15. Ventajas y Desventajas del Biogás

Ávila (2009), menciona las ventajas y desventajas del biogás.

Ventajas:

- La fermentación anaerobia de la materia produce un residuo de excelentes propiedades fertilizantes y esto le trae beneficio al suelo, similares a los que se alcanza con cualquier otra materia orgánica.
- Actúa como fuente de energía y nutrientes para el desarrollo de núcleos microbianos que mejoran la solubilidad de los compuestos minerales del suelo.
- Depuración ambiental y ecológica (contaminación y calentamiento global)
- Fertilizantes de gran calidad.
- Por medio de esta técnica se contribuye a la propagación de la vida corta de las reservas con que se cuenta.

- La materia prima es existente en cualquier lugar.

Desventajas:

- Tipo de sustrato (nutrientes disponibles).
- Temperatura del sustrato, la carga volumétrica.
- Tiempo de retención.
- Nivel de acidez (pH)
- Relación Carbono/ Nitrógeno.
- Concentración del sustrato, el agregado de inoculantes.
- Presencia de compuestos inhibidores del proceso.

2.16. Producción de Cerdo en México

SIAP (2013) menciona que a nivel nacional en el periodo 1996-2005 los inventarios tuvieron una reducción de 199 mil cabezas, es decir una tasa media anual de crecimiento de -0.1%. Jalisco que es el principal productor tuvo una caída de -0.6% anual. Sin embargo Puebla aumento sus inventarios en 13.7% anual, al pasar de 382 mil cabezas en 1995 a 1,214 miles de cabezas en 2005.

Cuadro. No. 6 Inventario de entidades con mayor Ganado Porcino 2000-2006 (miles de cabeza). Fuente SIAP, 2013

CONCEPTO	2000	2001	2002	2003	2004	2005	PROMEDIO	%
JALISCO	2,289	2,287	2,236	2,114	2,203	2,298	2,238	14.8
SONORA	1,208	1,169	1,143	1,181	1,207	1,279	1,198	7.9
YUCATAN	1,182	1,155	1,149	1,056	1,187	993	929	6.1
VERACRUZ	1,175	1,168	1,168	1,087	1,015	1,094	741	4.9
PUEBLA	1,228	1,216	1,187	1,107	1,108	1,214	1,177	7.8
GUANAJUATO	1,078	1,026	971	937	947	1,016	996	6.6
GUERRERO	845	815	856	853	852	832	842	5.6
MICHOACAN	881	873	856	805	811	736	827	5.5
OAXACA	839	848	837	838	878	742	830	5.5
CHIAPAS	681	690	675	706	725	735	702	4.6

MEXICO	651	596	603	523	540	543	576	3.8
SUBTOTAL	12,057	11,843	11,681	11,208	11,473	11,484	11,624	76.8
RESTO	3,334	3,427	3,442	3,418	3,704	3,722	3,508	23.2
TOTAL	15,391	15,269	15,123	14,625	15,177	15,206	15,132	100.0

Fuente: SERVICIO DE INFORMACION AGROALIMENTARIA Y PESQUERA (2013). (SIAP).

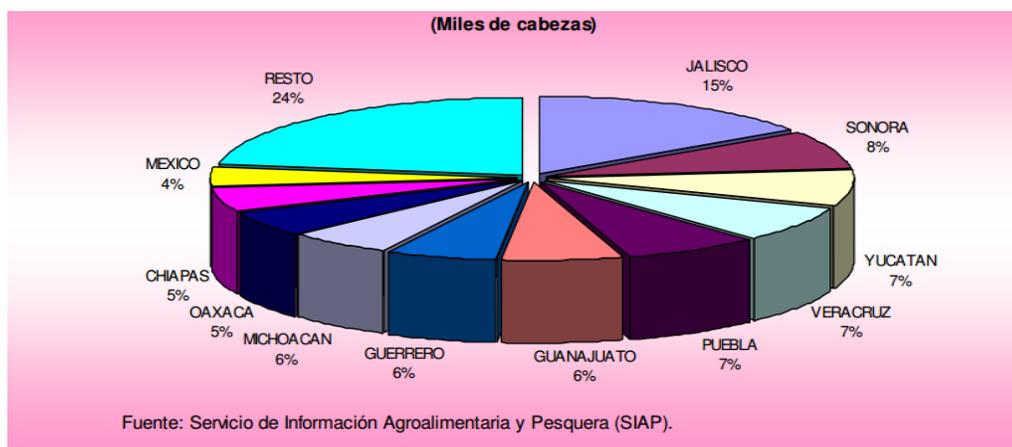


Figura. No. 6. Inventario de ganado porcino 1996- 2006.

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

2.17. Estiércol en México

Trinidad (2013), cita que la producción anual de estiércol en México, se estima en 61 millones de toneladas al año, considerando el proveniente de ganado estabulado y semiestabulado.

Pérez (2006), menciona que la mezcla de residuos, sólidos y líquidos que son acarreados por el agua de lavado se conoce como agua residual; sus principales ingredientes son las excretas (heces y orina) agua, alimento desperdiciado, cama suelo y otras partículas.

La tasa de excreción de heces y orina depende de múltiples factores: la edad del animal, sexo, madurez fisiológica cantidad y calidad del alimento ingerido, volumen del agua consumida, clima y otros factores menos importantes.

Taiganides, et all. (1996) citado por Pérez (2006), cita que estudios estadísticamente significativos realizados sobre este tema en EU, Malasia, Singapur y Chile, se sabe que la orina representa el 45% y las heces 55%; el contenido de humedad de la excreta es de 88%; cerca de 90% de los sólidos se excreta en las heces y el 10% en la orina como minerales, potasio, fosforo y amoniaco- nitrógeno.

Los lechones, destete y hembras lactantes excretan cerca de 8% de su peso vivo por día, los cerdos en crecimiento y finalización excretan cerca de 7%, sementales y hembras gestantes y secas, animales que tienen acceso limitado de alimento, excretan cerca de 3% de su peso vivo.

La información sobre la tasa de excreción de los cerdos solo es confiable cuando se han obtenido numerosas muestras. En México, ese tipo de muestreo exhaustivo nunca se ha realizado; se emplea un promedio de varias fuentes que es de 6.17 kg de heces y orina por día por unidad de producción animal (6.17kg/100kg de peso vivo). Este promedio es igual a 6.71% del peso vivo total en la granja, dato fundamental para el cálculo de la cantidad de excretas a tratar.

Se han realizado varios cálculos para estimar la cantidad de excreta (heces + orina + agua) que se producen en una explotación porcina; a continuación se enumeran algunos de ellos:

Pérez Espejo (1992) citado por Pérez (2007), menciona que por cada 70 kg de peso vivo en granja, se producen entre 4 y 5 kg de excreta, por su parte Gadd (1973), menciona que el promedio de producción de excretas en engorda, puede ser un décimo del peso vivo por día (sólido y líquido), lo que representa 1.36 kg de heces y 4.73 l de orina por día en promedio desde el destete hasta el peso al sacrificio; Penz (2000), proporciona datos del volumen diario de excretas producidas por tipo; Sweeten (1979), estima la cantidad anual producida por unidad cerda (lo que equivale a una hembra más los cerdos producidos por ella en un año), cantidad que representa 13 ton de excretas por año, con un contenido de 10% de materia seca.

Al formar raciones para las aves es aconsejable emplear principalmente granos pobres en fibra, como el maíz y el trigo.

El valor nutritivo de las excretas de ave, es mayor que el de otras excretas de animales, pues son especialmente ricos en proteínas y minerales (cuadro No. 7). (García et. al., 2014.)

Cuadro No. 7. Valor nutritivo en base seca de diferentes excretas

Composición	Tipos de excretas				
	Excreta de pollos de ceba	Excreta deshidratada de ponedora	Excreta de buey	Excreta de vaca	Excreta de cerdo
Proteína bruta, %	31.30	28.00	20.3	12.70	23.50
Proteína verdadera, %	26.70	11.30	-	12.50	15.60
Proteína digerible, %	23.30	14.40	4.70	3.20	-
Ceniza, %	15.00	28.00	11.50	16.10	15.30
Calcio, %	2.40	8.80	0.87	-	2.72
Fósforo, %	1.80	2.50	1.60	-	2.13
Magnesio, %	0.44	0.67	0.40	-	0.93
Sodio, %	0.54	0.94	-	-	-
Potasio, %	1.78	2.33	0.50	-	1.34
Hierro, ppm	451	2000	1340	-	-
Cobre, ppm	98	150	31	63	-
Magnesio, ppm	225	406	147	-	-
Zinc, ppm	235	463	242	530	-

Fuente: Fontenot, (1999).

Cuadro. No. 8. Producción diaria de excretas producidas según el tipo de cerdo.

Etapa	Estiércol Kg/día	Estiércol + Orina Kg/día	Volumen Litros/día	Volumen M3/animal/mes
25 – 100 Kg	2.3	4.9	7.0	0.25
Hembra	3.6	11.0	16.0	0.48

H. Lactación	6.4	18.0	27.0	0.81
Semental	3.0	6.0	9.0	0.28
Lechón	0.35	0.95	1.4	0.05
Promedio	2.35	5.8	8.6	0.27

Fuente:(Dourmand, 1991)

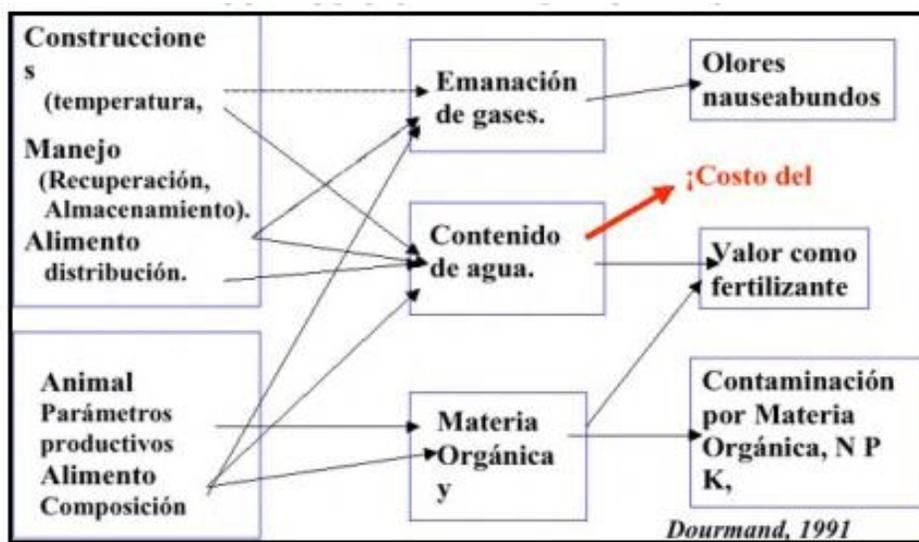


Figura. No. 7. Principales factores que afectan la cantidad y composición de las excretas. Fuente: Dourmand, (1991).

2.18 Rendimiento de biogás a partir de sustratos diversos

Eatòn (2013), menciona las diferentes materias primas para la producción de biogás y el rendimiento de cada una (Cuadro No. 9)

Sagori (2003) menciona los resultados obtenidos en su experiencia de laboratorio sobre la producción de biogás en reactores y también ilustra los resultados que obtuvo al aplicando una fórmula matemática que se propuso .en la figura No. 10.

Rodriguez y Urbina 2014, citan los siguientes resultados de la producción de estiércol y biogás que se encuentran en el cuadro No. 9.

Figura No. 8 Materias primas para la producción de biogás.

Tipo de residuo	Litros de biogás por cada Kg sólido fresco	Contenido de Sólidos totales (% de st)	Contenido de materia Orgánica volátil (% de metil)				
Estiércol vacuno	15 - 40	18,00 - 20,00	83,00	Desechos De huerta	39 - 63	11,00	94,00
Estiércol porcino	50 - 70	18,00	89,00	Residuos amiláceos ó Azucarados (papa, manduca, remolacha)	100	18,00	94,00
Estiércol aviar Parrilleros	30 - 50	53,00	66,00	Residuos De comida	75 - 120	19,60	90,60
Estiércol aviar Poseedores	35 - 55	35,00	90,00	Sorgo granifero	550	96,00	98,00

Fuente: Eaton, (2013).

Figura No. 9. Máxima generación de metano obtenida en forma experimental y teórico.

	Excremento de vaca	Excremento de cerdo	Mezcla de aceite y grasa
Mmax Experimental (litros metano/kg sólido volátil)	85	110	135
Mmax De acuerdo con la definición (2) (litros metano/kg sólido volátil)	90	110	150
Mmax De acuerdo con la fórmula (4) (litros metano/kg sólido volátil)	90	111	125

Fuente: Sagori, (2013).

Cuadro No. 9. Producción de estiércol y biogás en cada especie animal.

Tipo de animal	estiércol	Biogás/kg.
Vacas	6-10 kg/día	60 lts
Cerdos	2.25 kg/día	78 lts
Gallinas	0.18 kg/d	62 lts

Fuente: Rodríguez y Urbina, (2014).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización geográfica

La presente investigación fue desarrollada en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en la sección Agrotecnia, en Buenavista, Saltillo, Coahuila en el año 2013. El campus se encuentra localizado al sur de la ciudad de Saltillo en el km. 8 de la carretera a Zacatecas, entre los paralelos 25°22' y 25°21' de latitud norte y los meridianos 101°01' y 101°03' de longitud oeste, con una altitud de 1754 m.s.n.m. El clima es seco y templado con lluvias en verano principalmente. la temperatura media anual de 17.8 °C con una oscilación media de 10.4 °C y una precipitación media anual de 490 mm, teniendo una humedad relativa media anual de 64.8 %. Suarez (2010).



Figura No. 10. Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la República Mexicana

3.2. Materiales Utilizados:

Los materiales que se utilizaron en el experimento son los siguientes:

3.2.1. Material Biológico:

Se utilizaron diferentes estiércoles aplicados a los diferentes tratamientos, los cuales fueron:

1. 600 gr. de estiércol de cerdo de la granja porcina deshidratado.
2. 300gr. de estiércol de cerdo de la granja porcina fresco
3. 600 gr. de Estiércol de cerdo fresco de la unidad metabólica.
4. 900 gr. de gallinaza de granja deshidratado.
5. 600 gr. de estiércol de bovino del establo lechero deshidratado.
6. 300 gr de estiércol de bovino del establo lechero fresco.

3.2.2. Material de Laboratorio

Se utilizaron los siguientes materiales:

- 12 matraces Erlenmeyer con capacidad de 1 litro.
- 12 tapones de goma para sellar los matraces.
- 12 bolsas de plástico para suero con capacidad de 1 litro para la recolección del biogás.
- 12 mangueras de paso para cada una de las bolsas.
- 1 potenciómetro para la lectura del pH de la marca Orión.
- Balanza analítica con la capacidad de 200gr. de la marca Ohaus.
- Vaso de precipitado con la capacidad de 500 ml.
- Baño María con 2 calentadores eléctricos, con control de temperatura.
- Medidor de biogás marca Top-T Mass flow meters. Sierra 820 series, el cual mide la producción de biogás en (ml).

Fabricación de los biodigestores

Para estos experimentos se adaptaron matraces Erlenmeyer de un 1litro de capacidad como biodigestores. Estos se acondicionaron con un tapón de goma para sellar la parte superior del matraz. A estos tapones se les realizaron dos perforaciones, uno donde se conectó la manguera de paso que va a la bolsa donde se captó el biogás, y al otro agujero se conectó un tubo de vidrio a través del cual se tomaron las muestras para lectura de pH.

En los matraces, que tuvieron la función de los biodigestores, se realizaron las mezclas que consistieron en una relación de 100 gr estiércol y 800 ml de agua, esto para cada uno de los matraces que se utilizaron en la fase respectiva. A cada uno de los matraces le correspondió un estiércol diferente, de acuerdo al tratamiento correspondiente. Al tener los matraces con sus respectivos tratamientos, se dejaba en reposo 24 hrs con la finalidad que los estiércoles se hidrolizaran.



Figura No.11. Descripción gráfica del biodigestor

3.3. Sistema Baño María

A este sistema se le agregó agua hasta un poco arriba de un cuarto de su nivel, dejándose encendida durante 24 hrs, para que alcanzara la temperatura del agua óptima para la investigación, (entre los 32 y 38 °C).

3.3.1. Instalación de los Biodigestores

Antes de ser introducidos los biodigestores cargados al baño María, se les tomó el pH a cada uno de los tratamientos con el propósito de registrar el pH de inicio. Una vez determinado lo anterior, se colocaron los biodigestores en el baño maría. La distribución de los matraces fue conforme al diseño experimental indicado. Los tratamientos y su distribución en la fase 1 fueron los siguientes:

Tratamiento 1: estiércol de cerdo de granja deshidratada.

Tratamiento 2: gallinaza deshidratada.

Tratamiento 3: estiércol de bovino lechero deshidratado.

Cuadro No. 10. Distribución de los tratamientos en la primera fase

Repetición	No. de parcela	No. de tratamiento	Descripción
I	1	1	100 gr. h. de cerdo de granja deshidratada + 800 ml. de agua.
I	2	2	100 gr. de gallinaza deshidratada+ 800 ml. de agua.
I	3	3	100 gr. h. de bovino lechero+ 800 ml. de agua.
II	4	3	100 gr. de gallinaza deshidratada + 800 ml. de agua.
II	5	1	100 gr. h. de cerdo de granja deshidratada + 800 ml. de agua.
II	6	2	100 gr. h. bovino lechero deshidratado + 800 ml. de agua.
III	7	3	100 gr. de gallinaza deshidratada + 800 ml. de agua
III	8	2	100 gr. h. de cerdo de granja deshidratado + 800 ml. de agua.
III	9	1	100 gr. h. de bovino lechero deshidratado + 800 ml. de agua.



Figura. No. 12. Tratamientos en el Baño María

3.4. Parámetros Evaluados

Los parámetros que se evaluaron en este experimento fueron:

3.4.1. pH de la mezcla

La medición de este factor se realizó diariamente a diferentes horas, durante un periodo de siete días de la investigación.

3.4.2. Volumen de biogás

Para almacenar el gas que se estaba produciendo, se utilizaron bolsas de suero herméticamente selladas, de un litro de capacidad. Estas se conectaban con una manguera al biodigestor. Diariamente se medía el contenido de biogás que se acumulaba en la bolsa.

Para evaluar la producción de biogás, se desconectaban las bolsas por un momento del biodigestor y se conectaba a la manguera que se adaptó al medidor de biogás. La lectura del de biogás se realizó en mililitros.



Figura. No.14. Bolsas usadas como recolectoras de biogás

Esta metodología se utilizó para las dos fases del experimento, las cuales se defirieron en los tratamientos estudiados.

3.5. Recolección de Estiércoles

Los estiércoles que se utilizaron en este experimento se colectaron en diferentes áreas experimentales de la Universidad, aunque algunos de estos materiales biológicos ya se encontraban en el laboratorio, los cuales fueron

colectados anteriormente: la gallinaza deshidratada provino de una granja avícola ubicada en Zacatecas, el estiércol de cerdo deshidratado y estiércol de bovino deshidratado provienen de la áreas experimentales de la universidad, ya que el material biológico que se utilizó en fresco se colectaron el mismo día del experimento, el estiércol de bovino fresco se colecto en el establo lechero , el estiércol de cerdo fresco de granja se colecto en la granja porcina y el estiércol de cerdo de traspatio se colecto en la unidad metabólica, ubicados en la Universidad.



Figura No. 15. Estiércoles de cerdo (izquierda) y gallinaza (derecha).

3.6. Preparación de las Muestras

Como los materiales que se requerían para el primer experimento se encontraban en el laboratorio se procedió a preparar las muestras siguiendo el procedimiento siguiente:

Se pesó una muestra de 100 gr. de cada uno de los materiales biológicos que se incluyeron en la investigación, los cuales fueron:

100 gr de estiércol de cerdo de granja deshidratado

100 gr de estiércol de bovino del establo lechero.

100 gr de gallinaza.

Cada uno de los anteriores materiales con tres repeticiones. Después de pesar el material biológico se distribuyó en cada uno de los matraces acondicionados como biodigestores.

Después se les agregó a cada biodigestor 800ml de agua, dejándose en reposo durante 24 hr, con el propósito de hidratar el material biológico.

3.7. Descripción de los Tratamientos

Este trabajo consistió en dos fases, la primera de ellas incluyó 3 tratamientos con 3 repeticiones cada uno, y la segunda fase se integró con 4 tratamientos y 3 repeticiones, los tratamientos utilizados en cada una de las fases se describen en los siguientes cuadros.No.11 y No. 12. La segunda etapa fue realizada con el propósito de incluir en la investigación estiércoles provenientes de otras fuentes no incluidas en la primera etapa.

Cuadro No.11. Descripción de los tratamientos utilizados primera fase

Tratamiento	Material
1	Estiércol fresco de cerdo de granja porcina.
2	Gallinaza de granja deshidratada.
3	Estiércol de bovino lechero deshidratado.

El estiércol de cerdo fresco se colectó en la granja porcina de la universidad.

Cuadro No.12. Descripción de los tratamientos utilizados segunda fase.

Tratamiento	Material
1	Estiércol de cerdo fresco de la unidad metabólica.
2	Estiércol de cerdo fresco de la granja porcina.
3	Estiércol de cerdo deshidratado de granja porcina.
4	Estiércol de bovino lechero fresco del establo.

El estiércol de cerdo fresco se colectó en la unidad metabólica y en la granja porcina. El estiércol fresco de bovino se obtuvo del establo lechero.

3.8. Análisis Estadístico

El análisis de varianza (ANVA) es la herramienta básica para el análisis de los modelos estadísticos de diseño de experimentos, porque permite descomponer la variabilidad de un experimento en componentes independientes que pueden asignarse a diferentes causas. El análisis de varianza se utiliza para determinar una razón de las diferencias observadas para comprobar hipótesis, nos permite verificar la diferencia entre dos o más medias (Montgomery, 2003) citado por Suarez (2010)

3.8.1. Diseño Estadístico

El diseño experimental utilizado fue bloques al azar con tres tratamientos y tres repeticiones. El modelo estadístico fue.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

dónde:

τ_i = efecto del i-esimo tratamiento en la j-esima repetición.

μ = efecto de la media general.

τ_i = efecto del i-esimo tratamiento.

β_j = efecto de bloques o repetición.

ε_{ij} = efecto de la media general en tratamientos y repeticiones.

Dónde:

$i = 1, 2, 3.$

$j = 1, 2, 3.$

3.8.2. DMS (Diferencia Media Significativa)

Como en el análisis de varianza se observó significancia estadística en el factor tratamiento, se realizó la prueba DMS con la ayuda de un programa estadístico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Biogás obtenido en la primera fase

En el análisis de varianza se observa que existe diferencia estadística significativa al 0.05 de probabilidad para el efecto de los tratamientos, esto indica que las variaciones en la producción de biogás se deben al efecto de los tratamientos y no al medio ambiente. En lo que respecta a los bloques (repeticiones), no se encontró significancia estadística para ninguno de los tratamientos. El coeficiente de variación fue de 17.9 %, como se observa en el cuadro No. 13.

Debido a la significancia estadística para el factor tratamiento, se realizó la evaluación de los valores promedios de producción de biogás con la Prueba de Medias Significativas (DMS), obteniendo los siguientes resultados:

El análisis de varianza de la producción de biogás se presenta en el cuadro 13.

Cuadro. No. 13. Análisis de varianza para la evolución de la producción de biogás en 3 tratamientos de materia orgánica.

Fuentes Variación	GL	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	F calc.
Bloques	2	1.21880	0.60940	4.17054 NS
Tratamientos	2	2.68705	1.34353	9.1947 *
Error Experimental	4	0.58446	0.14612	
Totales	8	4.49031		
C.V.17.9 %				

NS=No significativo ($P>0.05$)

*($P<0.05$)

Como muestra el cuadro No. 13, la producción de biogás fue estadísticamente diferente en el nivel de significancia de 0.05. De acuerdo con

esto, el mejor tratamiento fue el número dos (estiércol de gallina deshidratada), con una producción total de biogás de 1.90 litros en un periodo de siete días, seguido por el tratamiento uno (estiércol de cerdo de granja fresco), el cual obtuvo una producción total de biogás de 0.84 litros, y el tratamiento tres (estiércol de bovino lechero deshidratado), que tuvo una producción total de 0.66 Litros en el mismo periodo.

Todo indica que la mejor producción de biogás del tratamientos dos, está relacionado con su mayor contenido de elementos carbohidratados y proteínicos, producto de las dieta con la que es alimentada esta especie, así como por su tipo de digestión, le sigue el ganado porcino que es monogástrico no digiere bien los granos y estos salen del sistema digestivo más enteros esto hace que su estiércol sea rico en nutrientes, su dieta es rica en granos, lo que causa que su estiércol sea alto en granos como trigo, sorgo y maíz, los cuales forman parte importante en el alimento concentrado en su dieta balanceada. En ambos granos su endospermo es alto en carbohidratos de cadenas simple como almidones. La alimentación de las gallinas es también basada en los granos citados además de la soya, pero como las aves solo aprovechan un 15 - 20 % del alimento que consumen y excreta el resto del alimento, sus excretas son más ricas en nutrientes.

Como se observa en lo citado por García (2014), las excretas aviares contienen un alto contenido nutritivo, en comparación con las excretas de bovinos y cerdos. Ya que la base de la dieta de las aves es grano, y como se dijo anteriormente solo aprovecha de un 15-20 % de su alimento.

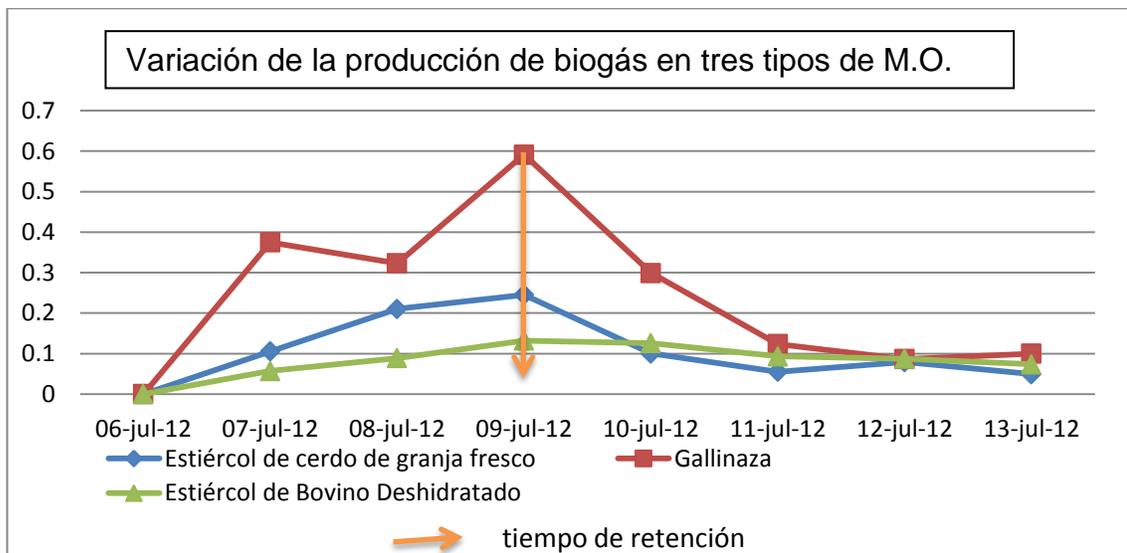
Debido a lo anterior se considera un factor importante en los mejores resultados en la producción de biogás con las excretas de aves. Cabe mencionar que en el caso de las aves, la orina y las heces fecales salen juntas del sistema digestivo, lo que incrementa el contenido de ácido úrico, rico en nitrógeno en su estiércol.

Cuadro No.14. Resumen de resultados para producción de biogás en la primera fase de estudio

Número de tratamiento	Tratamiento	Biogás total (litros)	Biogás/día (litros)	Biogás/gr.M. O. (ml)
1	Estiércol de cerdo de granja fresco	0.84	0.12	8.44
2	Gallinaza deshidratada	1.90	0.27	18.98
3	Estiércol de bovino lechero (t)	0.66	0.09	6.57

El resumen de los resultados para producción de biogás presentados en el cuadro 14, muestra que en la fermentación anaerobia al que fueron sometidos los diferentes tratamientos, la gallinaza y el estiércol de cerdo fueron los mejores materiales orgánicos que mostraron el mejor comportamiento para la producción de biogás en comparación con el estiércol de bovino lechero. Comparando los resultados obtenidos en este experimento y el de Sagori (2003) se observa que el estiércol de cerdo tuvo un mejor comportamiento para la producción de biogás comparado con el estiércol bovino. Debido a la alimentación que reciben cada uno de ellos, ya que los monogástricos no aprovechan al 100% los granos, caso contrario son los bovinos, y como cita Bundy y Diggins (1971), el maíz es el alimento básico en la producción de cerdo, los cuales tiene un alto contenido de carbohidratos.

Lo anterior se puede observar de forma más clara en la siguiente gráfica.



Grafica No.1. Evolución de tres tipos de tratamientos para la producción de biogás.

Como muestra la gráfica No. 1 los tres materiales orgánicos iniciaron su producción al segundo día del experimento, las máximas producciones se alcanzan al cuarto día de haber iniciado el mismo. Claramente destaca la producción de biogás de la gallinaza pues sobresale no solo en producción, si no en la rapidez de generación de biogás, pues en tan solo en 24 horas de iniciado el experimento ya había generado 0.37 litros contra 0.1 litro del cerdo y 0.06 del estiércol de bovino lechero. El cuarto día del experimento (96 horas) alcanza su pico de producción al igual que los otros tratamientos, pero con un sobresaliente de 0.6 litros contra 0.24 de estiércol de cerdo y 0.13 del estiércol de bovino. En este periodo de tiempo la producción promedio acumulada de biogás ya alcanzaba 1.29 litros para la gallinaza 0.56 para el cerdo y 0.28 para el bovino, lo que significa que en solo cuatro días los tratamientos ya habían alcanzado el 60.57%, 26.3% y 13.14 de su producción total de biogás respectivamente.

Lo anterior indica que el tiempo de retención en el proceso de fermentación anaeróbica para los tratamientos es de cuatro días, después del cual debe considerarse la recarga en el biodigestor de un porcentaje de materia orgánica para mantener ese alto nivel de producción de biogás; la cantidad de materia

orgánica a recargar será determinada en otro estudio que se realice al respecto pues no fue considerado en el presente, sin embargo por experiencia del asesor se considera un volumen de recarga que fluctúa entre 10 -20 % del contenido en el biodigestor. La recarga se realiza extrayendo el porcentaje señalado de efluente del biodigestor y reponerlo con la misma cantidad de mezcla de materia orgánica y agua.

Varnero (2011) menciona que el proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. En el caso de estiércoles animales, la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos.

Es importante destacar que en los tres tipos de materia orgánica que se evaluaron en esta investigación, fue posible obtener biogás a partir de la fermentación anaerobia; esto es importante para el agro mexicano por la alta generación de estiércol y de materia orgánica en general que se genera en las actividades agropecuarias propias del sector, y que en muchas ocasiones son causa de problema en las granjas de pequeños o medianos productores. Con esta tecnología sustentable, se aprovecha en forma total un desecho orgánico que genera problemas como problemas de espacio, de contaminación ambientales pues genera malos olores, insectos voladores como moscas partículas fecales en suspensión entre otros y se transforman en una fuente de energía calorífica y eléctrica de bajo costo y de un posible amplio uso en el sector , y además su efluente genera un bioabono que mejora la fertilidad natural de los suelos agrícolas permitiendo al agricultor no solo en fertilizantes químicos, sino obtener una mayor producción de cosechas y una mejor rentabilidad de su negocio.

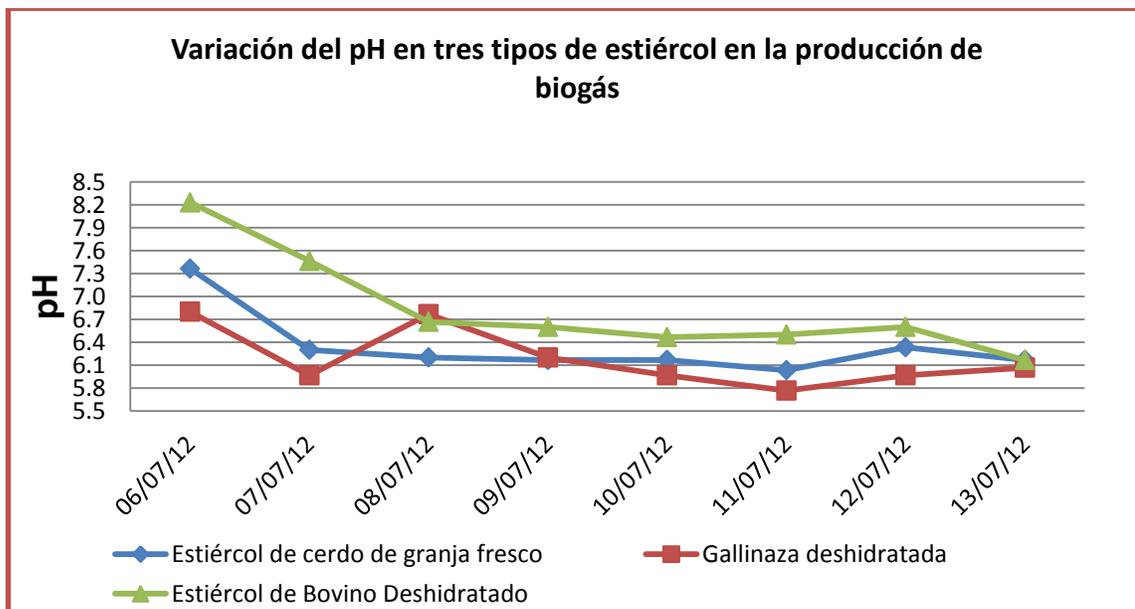
4.1.1. Efecto del pH en la Producción de Biogás

Como se muestra en la gráfica No. 2, el comportamiento del pH en cada uno de los tratamientos fue diferente. El estiércol de bovino presenta un pH alcalino (8.2) al inicio del estudio, siendo el más alcalino de los tres, pues el estiércol de cerdo registró un pH de 7.3 (ligeramente alcalino). Solo la gallinaza presentó un pH ligeramente ácido (valor de 6). Se considera que este factor inicial del pH está determinado por las diferencias en sus dietas alimenticias y, en menor grado, por el nivel de hidratación en que se encuentran los estiércoles (fresco y deshidratado).

Como cita Garcia et. al. (2014) los diferentes tipos de estiércoles contienen diferentes valores nutricionales, ya que las excretas aviares son la que contienen mayores nutrientes en sus heces, le sigue la cerdo y por ultimo las excretas de bovino, debido a la dieta que cada una de ellas recibe.

En el proceso de fermentación anaerobia al que se sometieron los estiércoles en estudio en un periodo de ocho días, todos los tratamientos al final registran un pH ácido (gráfica 3), producto de la disminución de la actividad de las bacterias metanogénicas, que se alimentan de los ácidos orgánicos derivados del desdoblamiento de los carbohidratos complejos integrados por macromoléculas, presentes en la materia orgánica; de ésta se derivan ácidos orgánicos como el acético, propiónico y otros, sintetizados por las bacterias acidogénicas. El balance entre las funciones metabólicas de las bacterias acidogénicas y metanogénicas es de vital importancia para mantener una equilibrada fermentación anaeróbica y el proceso no colapse.

Como cita Varnero (2010), el proceso se desarrolla con pH no inferiores a 6 y pH no superiores a 8, ya que no sólo determina la producción de biogás sino también su composición, ya que si se tiene un pH inferior a 6 el biogás producido es muy pobre en metano, como reporta McCarty (1964), citado por Rocchi, 2012.), ya que si al caer el pH se acumula los ácidos grasos volátiles (AGV) y se acumula dióxido de carbono y la producción de biogás desciende.



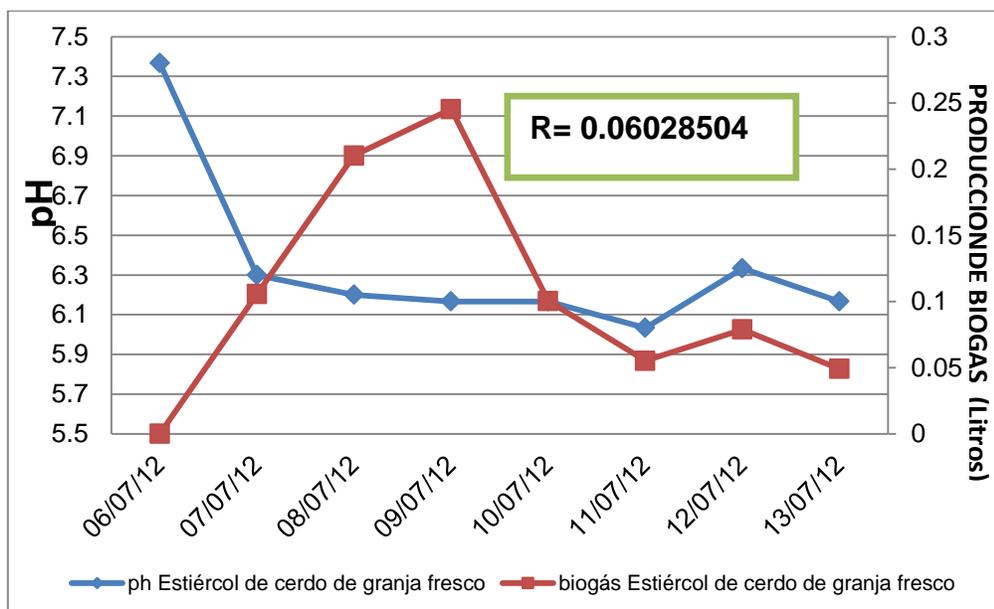
Grafica No. 2. Evolución del pH en tres tratamientos para la producción de biogás.

Las gráficas 2, 3, 4 y 5, muestran la relación que el pH tiene con el proceso de producción de biogás. Los resultados obtenidos muestran una baja correlación entre estos dos factores, motivado muy posiblemente con una amplia separación entre los valores de ambos factores en los primeros dos días de establecida la investigación, además el período de tiempo reducido que abarcó el estudio, no permitió una adecuada estabilización del proceso, lo que indica que en los próximos estudios, se debe extender los días dedicados al estudio en al menos 15 días más.

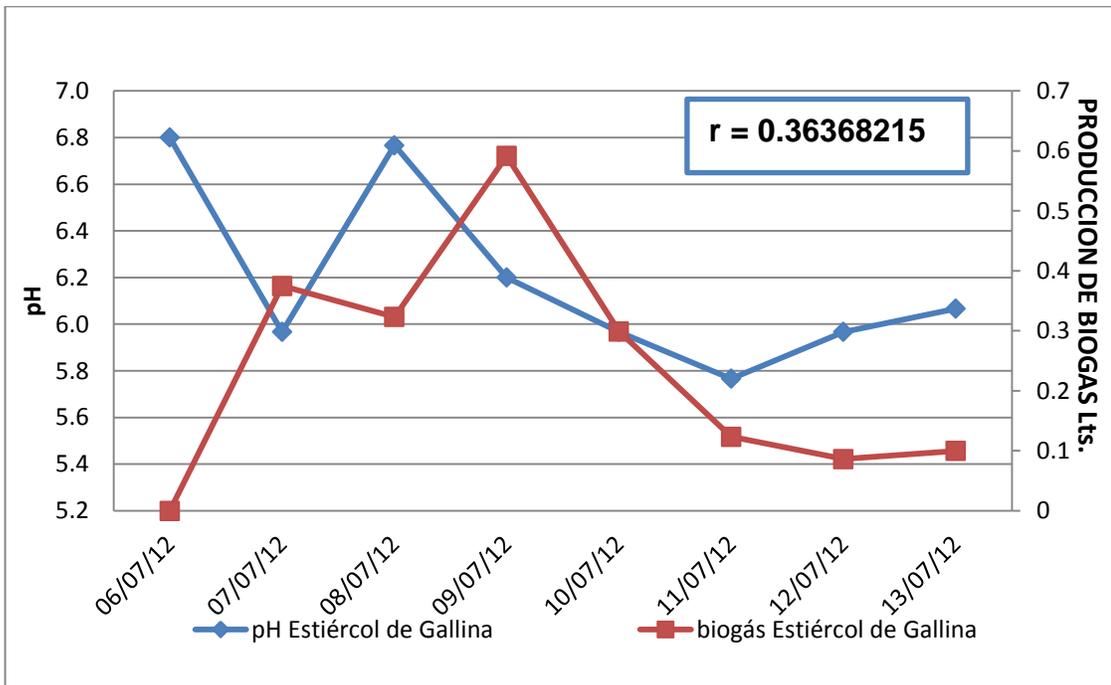
Los resultados anteriores no concuerdan con lo reportado por Suárez (2010) que cita a este respecto que la importancia del pH radica en que los organismos vivos, en este caso las bacterias, requieren un ambiente adecuado de pH para su desarrollo y actividad bioquímica. De este modo, muchas reacciones químicas solo se realizan en ciertos rangos de pH. Por lo anterior, su evaluación en los procesos de fermentación anaerobia es de gran importancia para determinar su efecto en el comportamiento de las bacterias inmersas en el proceso.

German Apropiate Exchange (2005), citado por Suarez (2010), menciona que se tiene en cuenta que la producción de biogás está en estrecha relación con el pH del efluente es decir, las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios bruscos en el pH que las bacterias acidificantes participantes en el proceso. Además un aumento en el pH, es índice de exceso de amoniaco en el efluente, en tanto que una disminución en el mismo es índice en contenido de ácidos orgánicos. Ambos factores provocan una disminución en la producción de biogás.

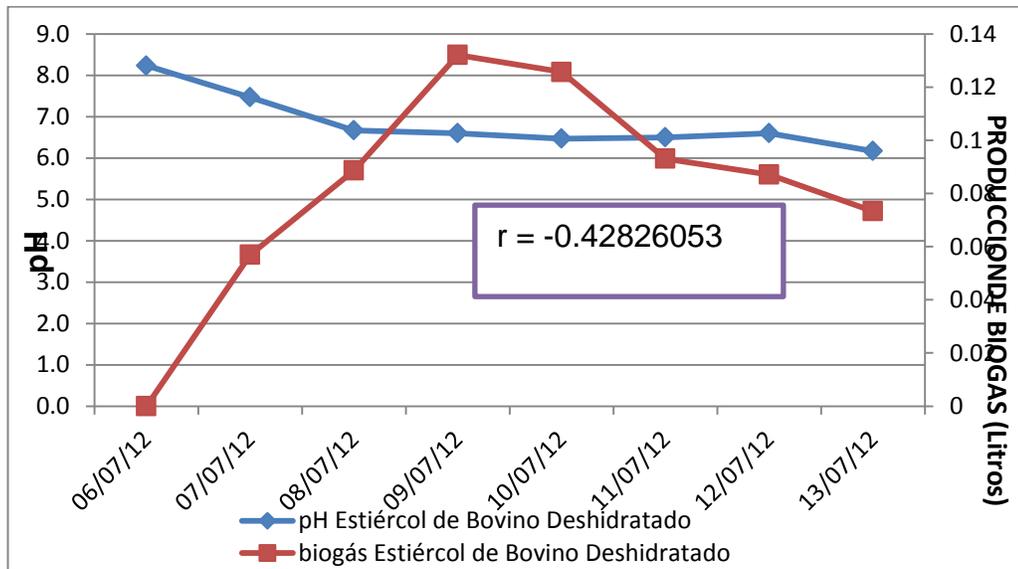
Lo encontrado en este trabajo respecto a la relación biogás-pH debe ser estudiado con mayor detalle con el propósito de conocer mejor los factores que inciden en esta relación, lo que permitirá un mejor manejo de los mismos y una mejor y mayor producción de biogás.



Grafica No. 3. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo fresco.



Grafica No. 4. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de gallina.



Grafica No. 5. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de bovino deshidratado.

4.2. Resultados Obtenidos en la Segunda Etapa

Esta segunda etapa fue realizada con el propósito de incluir en la investigación estiércoles provenientes de otras fuentes no incluidas en la primera etapa.

El análisis de varianza de la producción de biogás se presenta en el cuadro 14, en el que se puede observar que para esta tercera corrida que existe diferencia altamente significativa ($P < 0.05$) para el efecto de los tratamientos, esto indica que las variaciones en la producción de biogás se deben al efecto de los tratamientos y no al medio ambiente. En lo que respecta a los bloques (repeticiones), no se encontró significancia alguna. El coeficiente de variación fue de 14.1%.

Cuadro No. 14. Análisis de varianza de la producción de biogás en cuatro tipos de estiércol.

ANVA para producción de biogás de la batería no.2				
F.V	GL	SC	CM	F CAL
BLOQUE	2	0.11485	0.057425	1.14415 NS
TRATAMIENTO	3	3.08514	1.02838	20.48974 *
E.EXP.	6	0.30111	0.05019	
TOTAL	11	3.5011		
C.V= 14.1%.				

Debido a la significancia estadística para el factor tratamiento, se realizó la evaluación de los valores promedios de producción de biogás con la Prueba de Medias Significativas (DMS), obteniendo los siguientes resultados (Cuadro 15).

Cuadro No.15. Comparación de medias en la producción de biogás

Numero de tratamiento	Tratamiento	Media	Tratamiento	Media
2	Estiércol de Cerdo Granja fresco	1.46 _a	Estiércol de Cerdo Granja fresco	1.46 _a
4	Estiércol de Bovino Lechero Fresco	0.34 _b	Estiércol de Bovino Lechero Fresco	0.34 _b
3	Estiércol de Cerdo de Granja Deshidratado	0.28 _b	Estiércol de Cerdo de Granja Deshidratado	0.28 _b
1	Estiércol de Cerdo de la Metabólica fresco	0.25 _b	Estiércol de Cerdo de la Metabólica (Fresco)	0.25 _b
		DMS =0.4468 (al 0.05)	DMS =0.6768 (al 0.01)	

^{ab} Literales diferentes muestran diferencias (P>0.05)

Como muestra el cuadro No. 15, la prueba de medias muestra que el mejor tratamiento fue el número dos (estiércol de cerdo de granja fresco) con una producción promedio de 1.46 litros de biogás. Este tratamiento superó con 1.12 litros (429%) al tratamiento cuatro (testigo). El resto de los tratamientos fueron estadísticamente iguales.

Es interesante comparar los resultados alcanzados con las diferentes clases de estiércol de cerdo, clasificados de acuerdo a su procedencia, como se presenta en el cuadro 16.

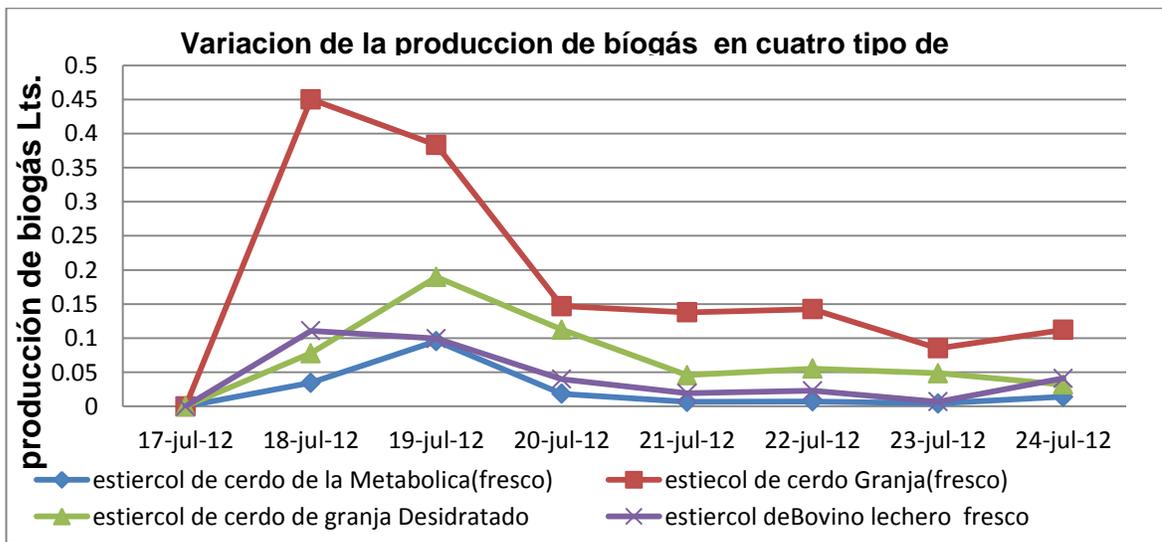
Cuadro no. 16. Comparación por su origen de tras diferentes tipos de estiércol de cerdo para producción de biogás.

Origen del Estiércol	Producción de biogás (mml)	Materia Orgánica/biodigestor (Gramos)	Litros Biogás /gramo de MO (mml)
Estiércol de cerdo de granja fresco	1460 _a	100	14.6
Estiércol de cerdo de granja seco.	280 _b	100	2.8
Estiércol de cerdo de metabólica fresco	250 _b	100	2.5

^{ab} Literales diferentes muestran diferencias (P>0.05)

Claramente se observa el mejor comportamiento del estiércol fresco proveniente de granja en la producción de biogás en relación con los otros tipos de estiércol de cerdo.

Esto se debe a la alimentación que cada uno de estos recibe , ya que los cerdos de granja tienen una alimentación a base de granos los cuales son principalmente maíz y sorgo, los cuales contienen alto contenido de proteína y carbohidratos , aunque algunos de estos no los digieren completamente salen en las excretas las cuales son ricas en estos nutrientes, para el caso de los cerdos de la metabólica, estos son alimentados con desperdicios de comida lo cual son pobres en cualquier tipo de nutrientes y eso se ve reflejado en las excretas ya que contiene un bajo contenido de nutrientes, con lo que respecta al estado de las excretas, como se puede observar en el cuadro 15, también tienen influencia el estado en que se encuentren las excretas ya que la de mayor producción de biogás fue la de cerdo de granja en fresco aunque la de la metabólica es fresca pero su alimentación es diferente a la del cerdo de granja.

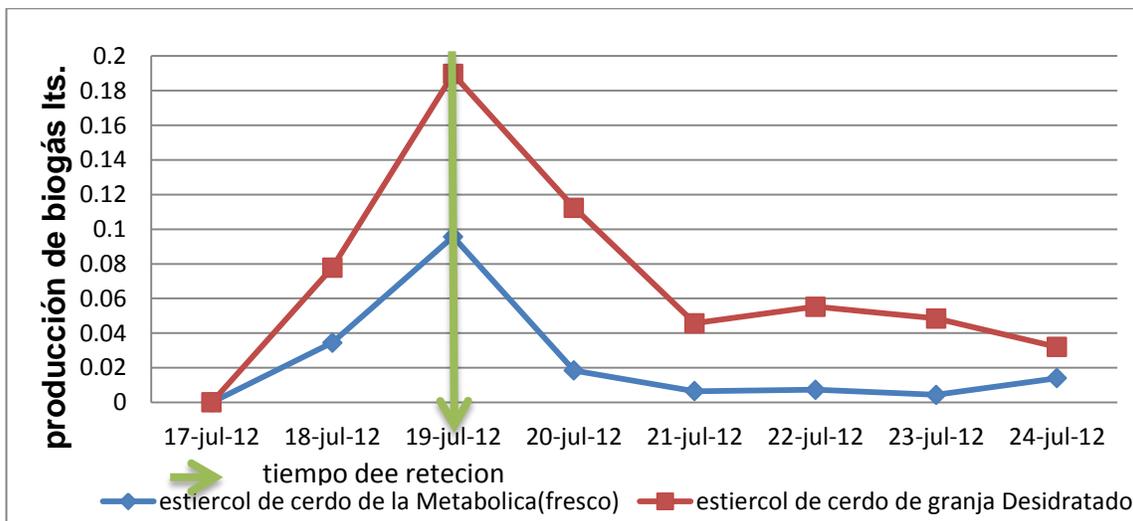


Grafica No. 6. Evolución de cuatro tipos de tratamientos para la producción de biogás.

La grafica 6 muestra que el comportamiento de la producción de biogás fue diferente para los cuatro tratamientos, esto de acuerdo al cuadro 16 de resultados promedios. Los tratamientos iniciaron la producción de biogás al segundo día de iniciado el experimento. la gráfica anterior muestra que la producción de biogás de cada tratamiento alcanzo su nivel máxima producción en diferente periodo de tiempo, el tratamiento 2 (estiércol de cerdo de granja fresco) y tratamiento 4 (estiércol de bovino lechero fresco) alcanzaron su máxima producción a las 24 horas y los tratamientos 1 (estiércol de cerdo de la metabólica fresco) y el tratamiento 3 (estiércol de cerdo de granja deshidratado) alcanza la mayor producción a las 48 horas, después de lo cual todos los tratamientos iniciaron un proceso paulatino de caída en su proceso productivo. Se debe a que cada uno recibió una alimentación diferente y que los estiércoles se colectaron en fresco y en seco.

Como se observa en la gráfica 6, el tratamiento tres (estiércol de cerdo de granja en fresco) destaca en la producción de biogás, y la rapidez que alcance su máximo nivel de producción, ya que a las 24 horas de haber iniciado el experimento obtuvo el 96.4 % de su producción total y, el tratamiento cuatro (estiércol de bovino fresco), lo alcanza este nivel productivo pero con solo el 23.5% del volumen total de biogás generado en los ocho días de duración del estudio. Para los tratamientos uno (estiércol de cerdo de la unidad metabólica fresco) y dos (estiércol de cerdo de la unidad metabólica fresco) obtuvieron su máxima producción con un 52 – 30 % de su producción total respectivamente.

Ávila, 2009, menciona que lo concerniente a los estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que haya recibido los mismos. Los valores de producción y de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias. En cuanto al volumen de estiércoles producido por las distintas especies animales son variable de acuerdo al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos.

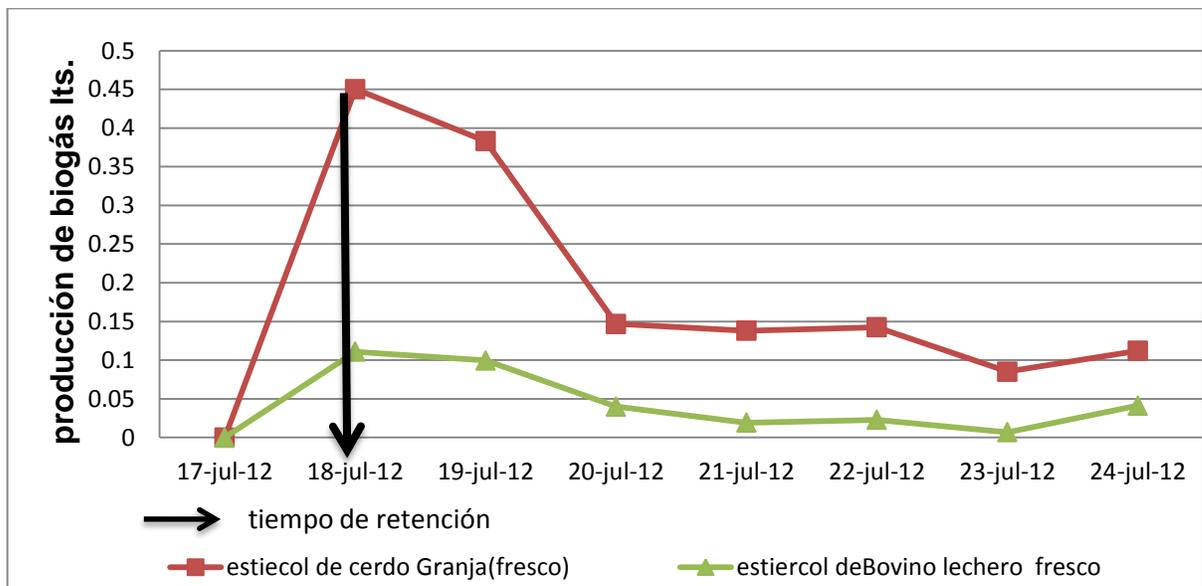


Grafica No.7. Tiempo de retención de dos tratamientos.

La grafica 7, muestra que el tiempo de retención de los tratamientos evaluados son a las 48 horas de haber iniciado el experimento, aunque los dos tiene un comportamiento similar no tiene la misma producción, claramente se observa el estiércol de cerdo de granja deshidratado destaca en la producción de biogás, debido al tipo de alimentación de cada uno de ellos y por el estado en el que se encuentran los estiércoles.

Hillbert (2013), menciona que las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura; mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás. Si se toma como ejemplo típico el uso de estiércol de ganado, los TRH varían con la temperatura media de cada región.

También Wayllas (2010) menciona el tiempo de retención está relacionado con la temperatura y que la temperatura deseada es de 30-35 °C.

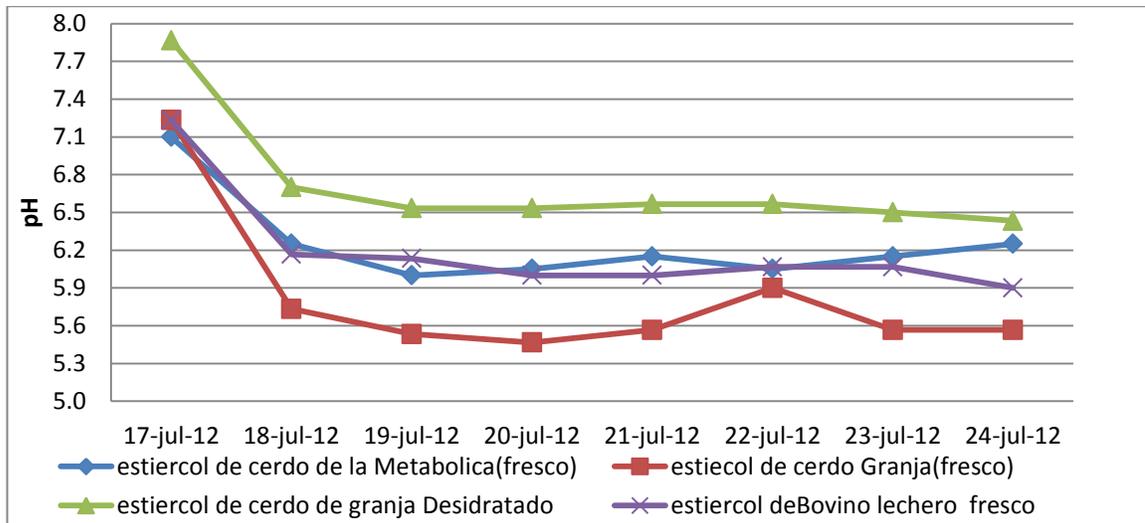


Grafica No. 8. Tiempo de retención de los estiércoles de cerdo de granja en fresco y estiércol de bovino lechero fresco.

La gráfica 8, muestra que para los dos tratamientos evaluados el tiempo de retención es de 24 horas, aunque los dos tenga un comportamiento similar no tienen la misma producción, claramente se observa que el estiércol de cerdo de granja en fresco tiene la mayor producción debido a que los dos tratamientos provienen de especies diferentes y de alimentación diferente ya que estos poseen diferentes estómagos, el cerdo no aprovecha al máximo los granos los cuales son ricos en carbohidratos y los bovinos aprovecha mucho más estos granos con esto el estiércol de cada uno de estos es diferente y su producción es diferente.

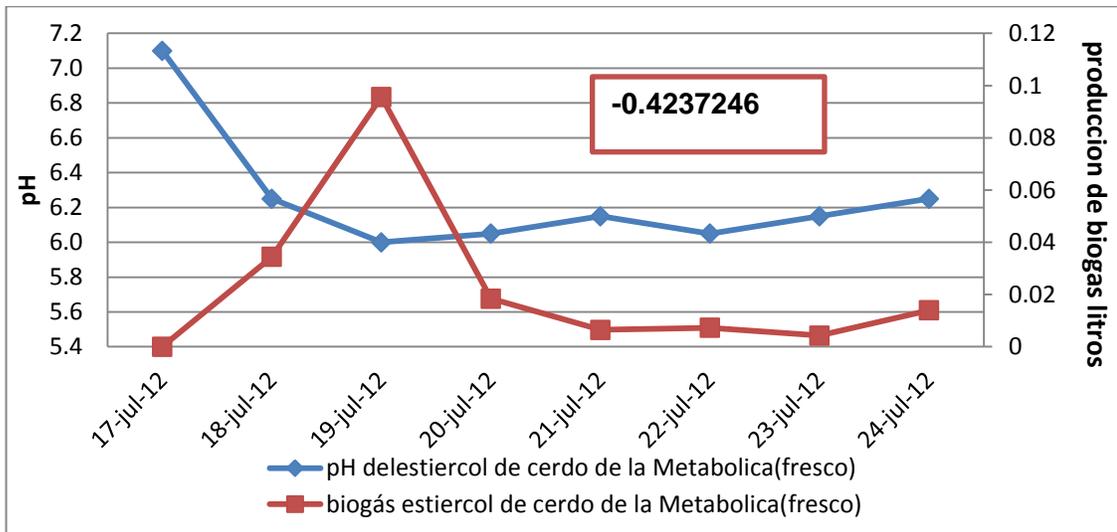
De acuerdo con varios autores, mencionan que la producción de biogás en excretas de cerdo es mayor comparada con las excretas de bovino, y como mencionan Garcia et. al. (2014), el estiércol de cerdo contiene un valor nutritivo mayor a la que contiene el estiércol bovino.

4.2.1 Potencial Hidrogeno (pH) en la Producción de Biogás



Grafica No.9. Comportamiento del pH en cuatro diferentes tipos de estiércol.

La grafica No. 9, indica que los estiércoles que se colectaron en fresco comienzan en un pH similar están entre 7.1 - 7.2 y que el estiércol que esta deshidratado comienza con un pH 7.9 , pero que al término del proceso de fermentación anaerobia los pH de los tratamientos terminan ácidos, esto se debe que los tratamientos en fresco no se han sometido a un secado y no han perdido agua, como cita Castrillón (2013) que la alcalinidad y conductividad son propiedades más del agua de lavado y de bebida, que propiamente de los estiércoles.



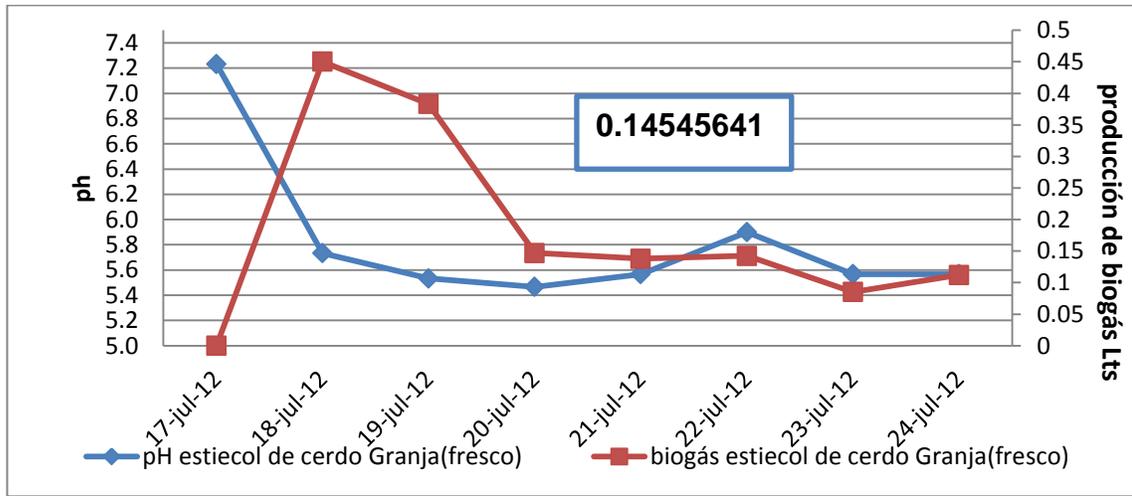
Grafica No. 10. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo de granja metabólica (fresco).

La grafica 10 indica que el pH no está relacionada con la producción de biogás, al inicio del experimento se tiene que el pH inicia alcalino y no se tiene producción de biogás, al segundo día el pH se presenta ácido y es aquí donde empieza la producción de biogás, al tercer día es donde se presenta la mayor producción de biogás con un pH de 6.0, en los cinco días restantes el pH se mantiene entre 6.1-6.3 y la producción de biogás decae al cuarto día, la relación del pH y la producción de biogás es que si el pH incrementa la producción disminuye y viceversa. Esto se debe a que al inicio del experimento estos dos factores tienen una separación entre sus valores.

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8.5. Las desviaciones de los valores son indicativos de un fuerte deterioro del equilibrio entre las bacterias de la fase ácida y la metanogénicas provocando por severas fluctuaciones en algunos de los parámetros que gobiernan el proceso. (Ávila 2009).

La grafica anterior no se comporta como cita Ávila (2009) ya que la mayor producción se obtuvo cuando el pH estaba descendiendo, lo cual no concuerda con lo citado, sino que se comporta en forma contraria, esto pudo deberse a que

el experimento aún se estaba estabilizando y que la materia orgánica provenía directamente de la granja porcina (metabólica), lo cual pudo contener residuos de la dieta que se les proporciona y a eso se debió que el pH y la producción de biogás no se comportara como Ávila (2009) cita.

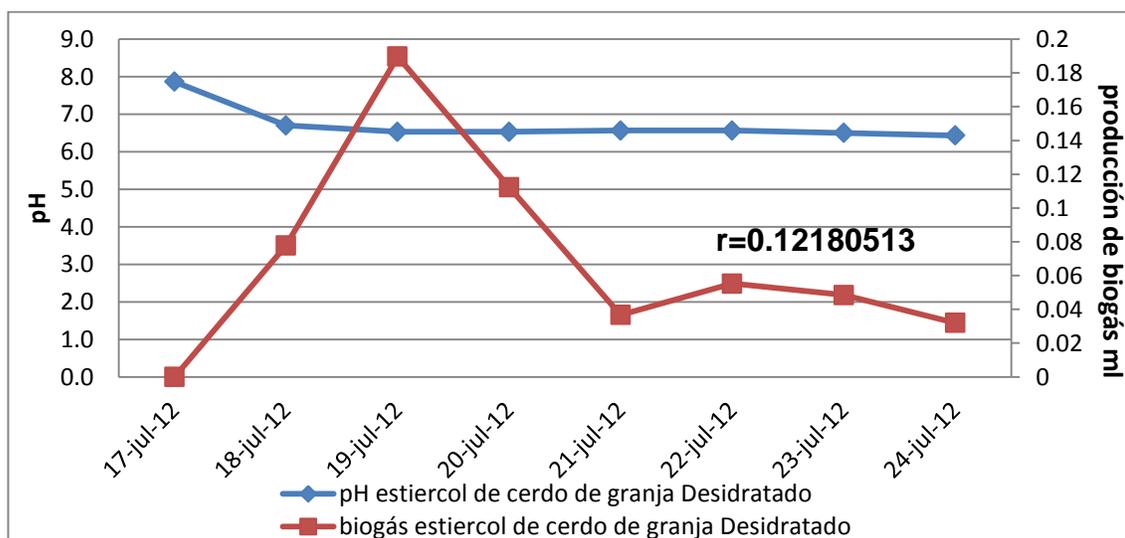


Grafica No.11. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo de granja (fresco).

La grafica 11 indica que el pH es de 7.2 para este tratamiento al igual que el anterior no presenta producción al inicio del experimento, al segundo día el pH se encuentra ácido y es donde inicia la producción y para este tratamiento es aquí donde se obtiene la mayor producción de biogás, la tercer día la producción descende, pero al cuarto día es donde la producción disminuye, el pH se mantiene un rango de 5.5-5.9, y en este caso la producción de biogás y el pH están más relacionados y que en los últimos días si el pH incrementa la producción también y viceversa.

Algunas investigaciones han señalado que el rango optimo del pH para los microorganismos formadores de metano se encuentran entre pH 6.7 a 7.4; Cendales (2011).

También cita que si el pH cae la producción también y e inhibe la actividad de los organismos que en ella participan. El pH afecta el metabolismo de la población microbiana, debido a que las enzimas que regulan el proceso son afectadas por los cambio en los grupos ionizable como el carboxilo y amonio, además faculta la desnaturalización de las estructuras proteicas

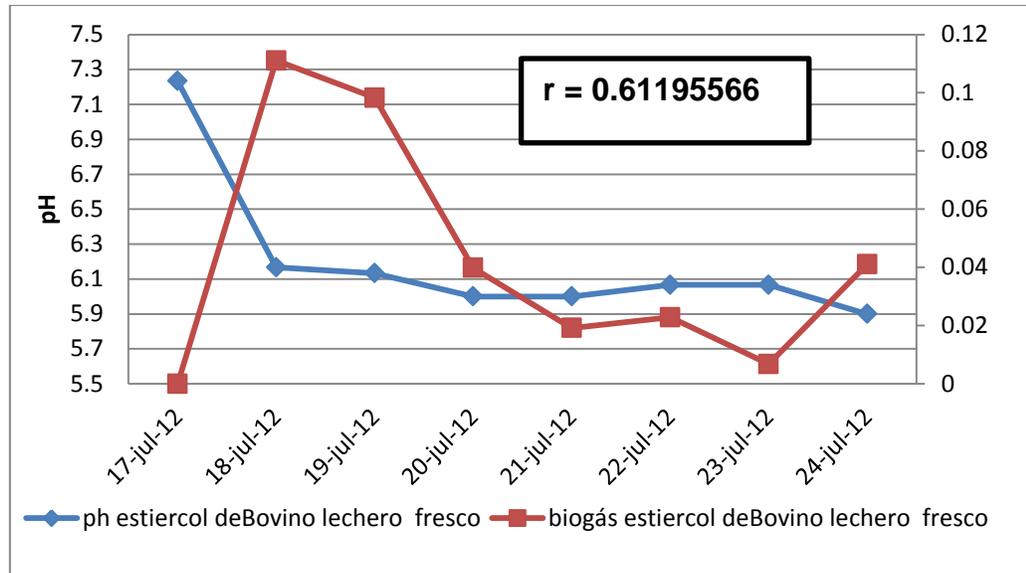


Grafica No.12. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de cerdo de granja deshidratado.

La grafica 12 muestra que el tratamiento tres presenta un pH de 7.9 al inicio del experimento, el cual es un poco más alcalino que los demás tratamientos ya que este es un estiércol deshidratado y se ha sometido a un secado, al segundo día comienza la producción con un pH de 6.7, al tercer día se tiene la mayor producción con un pH de 6.5, el cuarto y quinto día desciende la producción, los pH en el resto de los días se mantienen entre 6.6-6.4, y en este caso la producción disminuye si el pH lo hace y viceversa.

Como se ha citado anteriormente, el pH es importante ya que si una disminución de este se presenta, la producción de biogás decrece, al igual que si

aumenta, ya que la literatura dice que los niveles óptimos para su proceso oscilan entre 6.0 y 8.0.



Grafica No. 13. Relación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol de bovino lechero fresco

La grafica 13 muestra que el al inicio del experimento empieza alcalino y al segundo día este se encontró ácido y el resto del experimento se oscilaban entre 6.1-5.9. La producción empieza al segundo día y aquí donde se tuvo la mayor producción y al tercer cuarto y quinto día descendió la producción.

Al igual que el experimento anterior se observa en las gráficas que tiene pocas correlaciones el pH y la producción de biogás, ya que existe una separación entre estos valores. Solo el estiércol de bovino en fresco presenta una mayor correlación comparados con los tres anteriores.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH de acuerdo con Varnero (2011).

Pérez (2006), menciona que la digestión anaerobia se desarrolla en condiciones óptimas a un pH de 7.0 – 7.2 pudiendo tener una fluctuación entre 6.7 y 7.6. El pH en el digester es la función de la concentración de CO₂ en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima. Las bacterias responsables del mecanismo de producción de biogás son altamente sensibles a cambios en el pH.

5 CONCLUSIONES

1. Para la primera fase del experimento se rechaza la Ha1, ya que la gallinaza supera en producción al estiércol de cerdo de granja y al estiércol de bovino lechero.
2. En la fase dos el estiércol de cerdo de granja fue la mejor en producción, así que la Ha1 se acepta, aunque las excretas de cerdo de granja deshidratada y la de cerdo de traspatio (metabólica) no superaron a la excreta de bovino lechero fresco.
3. La Ha2 se acepta en la fase uno ya que las tres materias orgánicas presentan diferencias en producción, la cual fue mayor en la gallinaza, seguida de estiércol de cerdo y en menor estiércol de bovino.
4. La mejor materia orgánica fue el estiércol de cerdo de granja y en menor producción el estiércol de traspatio. Por lo anterior, se acepta la hipótesis Ha2, ya que la producción de biogás es diferente para el caso de los estiércoles de cerdo de granja y de traspatio (unidad metabólica). En la fase dos.
5. El pH en este estudio no mostró influencia en la producción de biogás, por lo que se rechaza la hipótesis Ha3, ya que el pH no influye en la producción de biogás. Este factor debe ser estudiado con más detalle. Ya que se obtuvo una baja correlación entre el pH y la producción de biogás, debido al periodo reducido que abarcó el estudio, lo cual no permitió una adecuada estabilización del proceso.
6. Los estiércoles son una excelente fuente para la producción de biogás, debido a que los que se estudiaron en este experimento produjeron biogás.

6. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar de acuerdo a los resultados de este estudio, para la producción de biogás, la gallinaza y en segundo término el estiércol de cerdo de granja.
2. Aprovechar el exceso de estiércoles que existen en la producción pecuaria.
3. Promover proyectos para el aprovechamiento de los diferentes tipos de estiércoles para la producción de biogás.
4. Al poner en marcha un proyecto para la producción de biogás, se debe tener cuidado en el factor pH ya que influye en la producción de biogás.
5. Se recomienda utilizar este proceso ya que las materias orgánicas estudiadas en este experimento generaron biogás.

7. LITERATURA CITADA

Ávila S. E. 2009. Biogás: opción real de seguridad energética para México. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, sección de estudios de Posgrado e Investigación. Consultada en:

<http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/bitstream/123456789/5826/1/BIOGAS.pdf>. El 21 de febrero de 2013

Cendales L. D. 2011. Colombia, Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de Magister en Ingeniería Industrial. Consultada en:

<http://www.bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>. El 14 de agosto de 2014.

Castrillón Q. O., Jiménez P. R., Bedoya M. O. 2013. Porquinaza en la alimentación animal. Artículo de revisión. Consultada en:

<http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/07276%20Porquinaza%20en%20la%20alimentaci%C3%B3n%20animal.pdf>. El 15 de marzo de 2013.

CONAE (Miguel Vargas González). 2007. Biodiesel. Consultada en: <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/466/2/biodiesel.pdf>. El 8 de mayo de 2013.

Chávez O. C. 2012. Gestión integral de residuos en México, X congreso nacional ICLEI. Consultada en: http://eventosicleimexico.org.mx/congreso_nacional/wp-content/uploads/2012/07/1-Mtro-Cesar-Chav%C3%A9z-CONGRESO-NACIONAL-ICLEI-COZUMEL.pdf. El 8 de marzo de 2013.

De La Guerra C. A. 2011. Generación distribuida a partir de biogás producido en granjas porcinas. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. Consultada en: http://132.248.9.195/ptb2011/agosto/0672080/0672080_A1.pdf. El 30 de marzo de 2013.

Eatón A. Biodigestores. Consultada en:

http://greenempowerment.org/wpcontent/uploads/2013/07/Biogascoursemanual_I_RRI_Mexico1.pdf. El 29 de noviembre de 2013.

FIRCO-SAGARPA. 2007. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Consultada en: http://www.cmp.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO_de_BIOGAS.pdf. El 8 de mayo de 2013.

García Y., Ortiz A., Lon W. E., 2014. Efecto de los residuos avícolas en el ambiente. Instituto de Ciencia Animal, Cuba. Consultada en: <http://www.fertilizando.com/articulos/efecto%20residuales%20avicolas%20ambiente.asp>. El 16 de agosto de 2014.

Gutiérrez V. E. 1995. Efecto de los ácidos grasos volátiles del proceso del rumen abomasal *in vitro* y de la melaza sobre viabilidad de la salmonella typhimurium. Tesis de doctorado. Consultada en: http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/Ernestina%20Gutierrez%20Vazquez.pdf. El 22 de marzo de 2013.

Guzmán P. E. 2011. El biogás una opción real para el desarrollo rural en México: tecnología en proceso de adopción, México. Tesis de licenciatura UAAAN.

Hilbert J. A. 2013. Manual para la producción de biogás, sitio argentino para la producción animal. Consultada en: http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=MANUAL+PARA+LA+PRODUCCION+DE+BIOGAS+&source=web&cd=1&ved=0CDUQFjAA&url=http%3A%2F%2Finta.gob.ar%2Fdocumentos%2Fmanualparalaproducciondebiogas%2Fat_multi_download%2Ffile%2FManual%2520para%2520la%2520producci%25C3%25B3n%2520de%2520biog%25C3%25A1s%2520del%2520IIR.pdf. El 26 de marzo de 2013.

Lobera L. J. 2011. Historia del biogás. Consultada en: [http://www.metabioresor.eu/upmedios/image/Historia%20del%20Biog%C3%A1s\(1\).pdf](http://www.metabioresor.eu/upmedios/image/Historia%20del%20Biog%C3%A1s(1).pdf). El 25 de marzo de 2013

Monroy C. 2013. Otras energías renovables: tecnología industrial. Consultada en: http://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/Otras_energias_renovables.pdf. El 07 de mayo de 2013.

ONU- Energías. 2007. Energía sostenible: un marco para la toma de decisiones. Consultada en: <http://> El 7 de mayo de 2013.

Pérez E. R. Granjas Porcinas y Medio ambiente (contaminación del agua, en la Piedad Michoacán) 1° edición, editorial Plaza Valdez, México 2006 pág. 192.

Rocchi M. G. 2012. Producción de metano a partir de las excretas del ganado lechero en condiciones de laboratorio. Tesis de licenciatura UAAAN.

Rodríguez D., Urbina A. 2013. Biodigestores, ¿cómo son y cómo construirlos? Consultado en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/prog-cerdos-biodigestor1.pdf>. El 15 de agosto 2014.

Sagori, N. 2003. Calculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. Consultada en: <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/07Tecnologicas/T-027.pdf>. El 30 de noviembre de 2013.

Sousa R. G. 2009. Metanol y etanol. Consultada en: <http://profesores.fib.unam.mx/l3prof/Carpeta%20energ%EDa%20y%20ambiente/MetanolEtanol.pdf>. El 8 de mayo de 2013.

Suarez B. S. 2010. Fermentación en seco para la producción de biogás utilizando rastrojo de maíz y estiércol de bovino, Saltillo Coahuila.

Trinidad S. A. (SAGARPA) 2013. Utilización de estiércol. Consultada en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilizaci%F3n%20de%20esti%E9rcoles.pdf>. El 13 de marzo de 2013.

Varnero M. M. T. (FAO) 2011. Manual de biogás. Consultada en: http://www.snvworld.org/sites/www.snvworld.org/files/publications/manual_de_biogas_2011.pdf. El 13 de marzo de 2013.

Wayllas P. J. P. 2010. Diseño de un biorreactor chino anaeróbico a partir del estiércol de vacuno en la comunidad el Olivo Pallatanga. Tesis de licenciatura. Consultada en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1633/1/236T0052.pdf>. El 12 de marzo de 2013.

Weber B., Rojas O.M., Torres B. M., Pampillom G. L., Producción de biogás en México estado actual y perspectiva, consultada en: <http://www.rembio.org.mx/2011/Documentos/Cuadernos/CT5.pdf>. El 29 noviembre de 2013.

http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/san_juan/712/biomasa_y_biog%C3%A1s.htm.