

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

División de Ciencia Animal

Departamento de Producción Animal



**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA UTILIZACIÓN DE
ESTIÉRCOL DE OVINO COMPARADO CON EL DE OTRAS
ESPECIES (BOVINO Y GALLINA)**

Por:

VIANNEY CASTILLO ARZATE

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para

Obtener el Título de

INGENIERO AGRÓNOMO EN ZOOTECNIA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Mayo del 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

AGRADECIMIENTOS

**DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LA UTILIZACION DE
ESTIÉRCOL DE OVINOS COMPARADO CON EL DE OTRAS
ESPECIES (BOVINO Y GALLINA)**

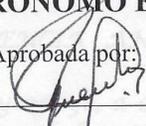
TESIS POR:

VIANNEY CASTILLO ARZATE

Que se somete a la consideración del Comité Asesor como requisito para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN ZOOTECNIA

Aprobada por:


Dr. Jesús Manuel Fuentes Rodríguez

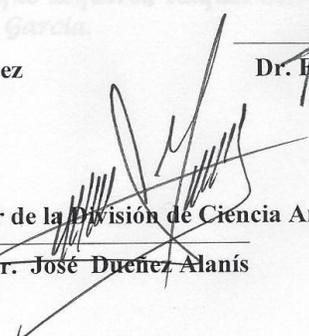
Asesor Principal


Dr. Juan Carlos Zúñiga Enríquez

Sinodal Principal


Dr. Fernando Ruiz Zarate

Sinodal


Coordinador de la División de Ciencia Animal

Dr. José Dueñez Alanís

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Mayo del 2015.

MANIFIESTO DE HONESTIDAD ACADEMICA

El suscrito Vianney Castillo Arzate estudiante de la carrera de Ingeniero Agrónomo Zootecnista, con matrícula 293714 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

Vianney Castillo Arzate

Nombre y Firma
Tesisista de Licenciatura UAAAN

AGRADECIMIENTOS

A TÍ DIOS

Por darme una oportunidad más de vida para poder culminar esta etapa “mi carrera profesional”.

A MIS PADRES

Por su amor, apoyo moral y económico y comprensión, por darme la oportunidad de cumplir este objetivo.

A RUBÉN RAMÍREZ MOSQUEDA

Porque con su ayuda, pude realizar este excelente trabajo. Gracias por darme la base sólida de una investigación.

A MI ALMA TERRA MATER

A mi querida e inolvidable Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Por permitirme haber sido uno más de sus hijos, en este hogar lleno de sabiduría, amistad y solidaridad, porque en cada rincón de este país existe un “buitre”.

A LA DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL Y DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN ANIMAL

Por brindarme su ayuda y apoyo, a cada profesor por los conocimientos brindados y por la entrega y dedicación que cada uno ponía en todas las clases impartidas, por la transmisión de sus conocimientos y el empeño de convertirnos en unos profesionales dignos de esta Universidad. En especial a: Manuel Torres, Enrique Esquivel, Raquel Olivas, Ana Verónica Charles, Camelia Cruz, Eduardo García.

A MIS ASESORES

Dr. Jesús Manuel Fuentes Rodríguez

Por haber depositado su confianza en mí y brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, por su disposición, amabilidad, orientación y apoyo durante la ejecución de la investigación.

Dr. Juan Carlos Zúñiga Enríquez

Por su apoyo y asesoramiento para efectuar de manera correcta este proyecto de tesis, agradezco los conocimientos transmitidos así como la confianza y amistad que me ha brindado. Le agradezco enormemente el tiempo dedicado y cada tutoría que me dio.

Dr. Fernando Ruíz Zarate

Por la disposición y tiempo dedicado a la revisión y corrección de esta tesis. Por los conocimientos transmitidos en clase y porque gracias a Ud. Obtuve un amplio interés por las especies ovina y caprina.

DEDICATORIAS

A MIS PEQUEÑOS ANGELITOS:

A mi hijo Jose Franco que cada día me enseña lo hermoso que es la vida y porque ud. hace que tenga un nuevo sentido, porque tú tienes el alma de tu pequeño hermano que no se encuentra con nosotros, pero que desde el cielo nos manda sus bendiciones.

Gracias por existir.

A MIS PADRES

Sra. María de la Luz Arzate Angeles

Sr. Saúl Castillo Piña

Amados padres, este trabajo implica representa el último esfuerzo en esta carrera, que no solo es mía sino también de ustedes, se los dedico, porque sin ustedes no hubiera podido ser posible, porque gracias a su apoyo y comprensión es que yo he podido terminar una carrera universitaria y con esto les demuestro que su esfuerzo y sacrificio no fue en vano.

A MIS HERMANAS:

Gema y Osciris Castillo Arzate, porque en todo momento me brindaron su apoyo y motivación. Las quiero y espero esto sea un ejemplo a seguir para ustedes.

A MIS AMIGOS (AS) Y COMPAÑEROS

Irene Carrasco Nerí, Gabriela Reyes Morales, Mercedes Santos Ángel, Rossy Durana Pantoja, Alba Dennis Pantoja Cedillo, Cecilia Peña, Nazario Villa Delgado y Junior Sánchez por estar en cada momento que los he necesitado, ya que gracias a ustedes conocí lo que es la verdadera amistad; compañeros de la Generación CXIV con quienes compartí comentarios de alegría, tristeza, satisfacción y conocimientos; gracias porque cada momento será único e irrepetible.

A todas aquellas personas que contribuyeron en mi formación como ser humano y profesionalista, que por descuido omito, les dedico esta satisfacción que tengo el día de hoy... y que perdurara para toda la vida.

Biografía

Mi nombre es Vianney Castillo Arzate, nací el día 06 de mayo del año de 1991, en el municipio de Temoaya, Estado de México, curse mis estudios en la escuela “Primaria Benito Juárez”, ubicada en Manzana Sexta, Jiquipilco. Después el siguiente grado en la “Secundaria Oficial No. 0448”, en la misma comunidad, el siguiente nivel de educación media lo realice en la Escuela Preparatoria Oficial No. 071, en la cabecera del municipio de Jiquipilco Mis estudios de educación superior fueron realizados en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; ubicada en Buenavista Saltillo, Coahuila, en el año 2008 a la carrera de Ingeniero Agrónomo en Zootecnia, y egrese en diciembre del 2012. En el año de 2015, presento mi examen profesional para obtener el título a través; de la tesis con el nombre de “Producción de Biogás a partir de la utilización de estiércol de ovino comparado con el de otras especies (bovino y gallina).”, donde esta investigación se realizó en el año del 2012.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIAS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE CUADROS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XII
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
Hipótesis.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Que son los biocombustibles.....	4
Importancia de los biocombustibles en el contexto mundial.....	5
Ventajas de biocombustibles.....	6
Desventajas de los biocombustibles.....	7
Procesos para la obtención de Biocombustibles: Biodiesel, Bioetanol y Biogás.....	8
Producción de Biodiesel.....	8
Producción de bioetanol.....	9
Biogás.....	9
Producción de Biogás a partir de la Basura.....	10
Producción de Biogás a partir de Estiércol.....	10
Historia del Biogás.....	11
¿Qué es el Biogás?.....	15
Métodos de obtención del Biogás.....	16
Aplicaciones del Biogás.....	16
Fermentación Anaeróbica.....	19
Etapas del proceso de la Fermentación Anaeróbica.....	20
Bacterias implicadas en la Fermentación Anaeróbica.....	22
Bacterias que participan en la etapa de Hidrolisis.....	22
Bacterias que participan en la etapa de Acidogénesis.....	22
Bacterias que participan en la etapa de Acetogénesis.....	23
Bacterias que participan en la etapa de Metanogénesis.....	23
Especies metanotróficas.....	23
Factores ambientales en el proceso de Metanogénesis (producción de Biogás)...	25
Naturaleza y composición bioquímica de materias primas.....	26
Relación carbono/nitrógeno de las materias primas.....	32
Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles.....	34
Temperatura.....	36

Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica.....	38
Rangos de pH y Alcalinidad.....	41
Ácidos grasos volátiles.....	44
Agitación-mezclado.....	45
Productos obtenidos de la Fermentación Anaeróbica.....	46
Biogás.....	46
Bioabono.....	47
¿Qué es un biodigestor?.....	47
Los ovinos en el Contexto Mundial.....	47
Los ovinos en el Contexto Nacional.....	48
Estiércol en México.....	49
Contenido nutrimental.....	50
MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
Localización geográfica.....	52
Materiales utilizados.....	53
Material biológico.....	53
Material de laboratorio.....	53
Recolección de material orgánico.....	55
Metodología.....	56
Etapas de la investigación.....	57
Descripción de tratamientos.....	58
Fabricación de biodigestores.....	59
Almacenamiento del Biogás.....	59
Variables evaluadas.....	60
Temperatura de la cámara de baño maría.....	60
Ph de la materia orgánica (estiércol).....	61
Volumen de biogás.....	61
Técnicas e instrumentos de retención de datos.....	61
Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	61
Análisis estadístico.....	62
Diseño estadístico.....	62
RESULTADOS Y DISCUSION.....	63
Biogás obtenido en la primera etapa.....	63
Efecto del pH en la producción de biogás.....	64
Biogás obtenido en la segunda etapa.....	67
Efecto del pH en la producción de biogás.....	71
Biogás obtenido en la tercera etapa.....	75
Efecto del pH en la producción de biogás.....	78
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	84
LITERATURA CITADA.....	85

ÍNDICE DE CUADROS

No.	Cuadro	Página
1	Fase Acidogénica y Metanogénica.....	21
2	Bacterias que participan en el proceso de la Fermentación durante las cuatro fases.....	24
3	Tipos de residuos.....	26
4	Composición química de diversos de Origen Animal y Vegetal (valores promedio, base seca).....	28
5	Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de Origen Animal y Vegetal.....	29
6	Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica.....	30
7	Producción de Biogás por tipo de Residuo Animal.....	31
8	Producción de Biogás por tipo de Residuo Vegetales.....	32
9	Valores promedio aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.....	34
10	Datos promedios sobre el contenido de solidos totales de diversos residuos.....	35
11	Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaeróbica.....	37
12	Tiempo de retención hidráulico de Estiércol de Ganado en distintas Regiones.....	39
13	Características generales del Biogás.....	46
14	Producción anual de Estiércol por especie animal en la República Mexicana.....	50
15	Contenido total de nutrimentos en algunos Estiércoles de México.....	51
16	Descripción de los tratamientos utilizados en la Etapa No. 1.....	58
17	Descripción de los tratamientos utilizados en la Etapa No. 2.....	58
18	Descripción de los tratamientos utilizados en la Etapa No. 3.....	59
19	Resumen de resultados de la producción de Biogás en la Primera Etapa.....	63
20	Resumen de resultados de la producción de Biogás en la Segunda Etapa.....	68
21	Resumen de resultados de la producción de Biogás en la Tercera Etapa.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Figura	Página
1	Participación de las Energías Renovables dentro del consumo final de Energía final.....	5
2	Proceso para la Producción de Biogás.....	11
3	Usos del Biogás.....	18
4	Esquemas de reacciones de la Digestión Anaeróbica de materiales.....	25
5	Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la República Mexicana.....	52
6	Cámara de baño maría del Departamento de Agrotecnia de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.....	53
7	Termómetro de la cámara baño maría.....	54
8	Potenciómetro utilizado para las muestras.....	54
9	Medidor de Biogás en flujo.....	55
10	Solución reguladora.....	55
11	Estiércol de ovino (izquierda) y gallinaza (derecha).....	56
12	Biodigestores adaptados en la cámara a baño maría.....	59
13	Bolsas de suero con el volumen de Biogás.....	60

ÍNDICE DE GRÁFICAS

No.	Gráfica	Página
1	Evolución de tres tipos de estiércol para la producción de biogás.....	64
2	Evolución del pH en tres tratamientos en la producción de biogás.....	65
3	Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol en bola y limpio de ovino.....	65
4	Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de gallinaza deshidratada.....	66
5	Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol deshidratado de bovino lechero.....	66
6	Evolución de tres tipos de Estiércol para la Producción de Biogás.....	69
7	Evolución del pH en tres tipos de Estiércol para la Producción de Biogás.....	71
8	Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol deshidratado y cribado de ovino.....	72
9	Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de gallinaza.....	73
10	Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol deshidratado de bovino lechero.....	73
11	Evolución de cuatro materias materia orgánicas para la Producción de Biogás.....	76
12	Evolución del pH de cuatro materias orgánicas para la Producción de Biogás.....	77
13	Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir de estiércol de ovino.....	78
14	Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir de 40% de estiércol de ovino y 60% de paja.....	79
15	Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir de 70 % de estiércol de ovino y 40% de paja.....	80
16	Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir estiércol de bovino lechero.....	81

RESUMEN

La presente investigación se realizó en las instalaciones del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. El objetivo de esta investigación fue la generación de biogás a partir de la fermentación anaeróbica del estiércol de ovinos criollos manejados en un sistema estabulado comparado con estiércol de bovino lechero y gallinaza, en tres etapas de estudio.

Los diferentes estiércoles utilizados en este proyecto se obtuvieron de diferente lugar; el estiércol de ovino (unidad metabólica de la UAAAN), el estiércol de bovino lechero (establo de la Universidad) y gallinaza (Jeréz, Zacatecas) con diferentes presentaciones para probar si esto influía en la producción de biogás; las cuales se colocaron en un biodigestor a nivel laboratorio. Los parámetros evaluados fueron el pH y el volumen de producción de biogás.

Los biodigestores fueron Matraces Erlenmeyer que se adaptaron en una cámara a baño maría, integrada por dos calentadores eléctricos y un termómetro para controlar la temperatura.

El diseño experimental utilizado fue de Bloques al Azar con tres tratamientos y tres repeticiones; para las dos primeras etapas y para la última etapa fue Bloques al Azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones.

Los resultados mostraron que para la primera etapa de la investigación, las materias orgánicas con mayor producción de biogás ($P>0.05$) fueron la gallinaza deshidratada y cribada, el estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero, con una producción de 2.93 y 1.82 litros por cada 300 gramos de materia orgánica; respectivamente en un periodo de siete días. Y en tercer lugar el estiércol de ovino en bola y limpio tuvo una producción de 0.25 litros por 300 gramos de materia orgánica.

En la segunda etapa el estiércol que tuvo mayor producción de biogás ($P>0.05$) fue de nuevo la gallinaza deshidrata con 5.70 litros por cada 300 gramos de materia orgánica, le sigue el estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero con 1.97 litros por 300 gramos de materia orgánica y en último lugar el estiércol cribado y deshidratado de ovino con 1.27 litros por los 300 gramos de materia orgánica. Estos resultados se debieron al contenido de nutrientes que tiene la gallinaza.

En la tercera etapa se evaluó solo el estiércol de ovino (con diferentes porcentajes de paja) comparándolo con el estiércol de bovino lechero (t); se obtuvo que hay una excelente producción con la adición de paja de avena; en esta etapa se arrojaron los siguientes resultados; teniendo la más alta producción ($P>0.05$) el tratamiento dos con 70% estiércol cribado y deshidratado de ovino y 30% de paja con 2.99 litros, le siguió el tratamiento tres de 40% estiércol deshidratado y cribado de ovino y 60% paja con una producción de 2.48 litros, en tercer lugar el tratamiento uno compuesto de 100% estiércol cribado y deshidratado de ovino, con una producción de 1.42 litros y en último lugar el tratamiento

cuatro con estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero (t) con 1.12 litros; todas las producciones de biogás se dieron con 300 gramos de materia orgánica.

Los resultados muestran que la mejor materia orgánica para producir mayor volumen de biogás es el estiércol de gallinaza, en segundo lugar el de bovino lechero, y por último lugar, pero con una notable producción de biogás es el estiércol de ovino adicionado con paja de avena.

El resultado de esta investigación indica que el pH tiene una influencia notable en la producción de biogás, dado que en la literatura se menciona que el proceso anaeróbico es afectado con pequeños cambios en los niveles de pH, y a esto se le puede atribuir que fue poco periodo de fermentación, y por tanto no se permitió observar un mayor registro de datos.

Palabras clave: biogás, fermentación anaeróbica, pH, volumen de biogás, tiempo de retención, estiércol de ovino, estiércol de bovino lechero, gallinaza.

Vianney Castillo Arzate: vca_1991@hotmail.com

INTRODUCCION

En la actualidad el mundo atraviesa por una crisis energética bastante severa, ya que la producción de energía que se conoce depende principalmente de los combustibles fósiles como el petróleo y de otros como el gas natural y la electricidad que además son altamente contaminantes en el medio ambiente, es por ello que surge la necesidad de generar fuentes alternativas para la producción de energía y que estas sean amigables con el medio ambiente, en este sentido hay una serie inclinación por fuentes de energía, sino además se puede producir con materiales que existen en abundancia.

López (2012), menciona que el Biogás es una mezcla de gases producidos por microorganismos que descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno y es utilizado para la producción de energía a través de un proceso físico, químico y/o mecánico a través de diversas tecnologías como la microturbina, máquina de combustión y digestores. El biogás se puede producir con casi cualquier residuo orgánico como los siguientes:

1. Residuos agrícolas (estiércol, paja, residuos de cosechas, tallos, hojas, pastos, podas,etc)
2. Basura urbana (residuos domésticos, desechos de mercado, lodos de plantas de tratamiento, etc.)
3. Desechos líquidos (purines de animales de granja, industria láctea y/o alimenticia, etc.)
4. Residuos industriales (melaza, bagazo, industrias de bebidas, etc.)
5. Cosechas energéticas (ensilado de cosechas, planta entera de maíz, soya, remolacha, etc.)

El crecimiento de la población a nivel mundial y en consecuencia, su mayor demanda de energía, el cambio en las condiciones ambientales, así como la reducción y dificultad cada vez mayor de acceso a yacimientos de combustibles fósiles, han planteado a la sociedad la necesidad de buscar fuentes alternativas para cubrir sus necesidades.

En este marco, incorporar gradualmente las nuevas fuentes renovables de energía en México, que combinen con el consumo de combustibles tradicionales, requiere de políticas públicas que impulsen entre otros, un programa que incentive la producción agropecuaria para la generación de Bioenergéticos, de tal manera que se asegure un aprovechamiento

sustentable de la gran Biodiversidad del existente, a la vez que fomente las condiciones que garanticen el abasto alimentario y el cuidado del medio ambiente.

Para lograr este objetivo, el sector agrícola de nuestro país tiene importantes retos en la producción de insumos animales y vegetales para la generación de Bioenergéticos, respetando la parte del medio ambiente con la base en criterios de sustentabilidad.

De acuerdo con la SAGARPA (2012), la actividad agropecuaria y el manejo adecuado de residuos animales y vegetales (biomasa) en distintas formas de energía, se genera el biogás, el cual está constituido principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este biogás puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica como método de tratamiento de residuos permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola (bioabono) y al mismo tiempo producir energía gaseosa (biogás).

Para ello se plantearon las siguientes preguntas de investigación mismas que a lo largo de esta tesis se busca dar respuesta:

¿Cuáles son las ventajas de la producción de biogás con estiércol de ovinos respecto a otras especies?

¿Qué factores influyen en la producción de biogás con estiércol de ovinos?

En congruencia a las preguntas anteriores a las que se busca dar respuesta se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo General

Generar biogás a partir de la fermentación anaeróbica del estiércol de ovinos criollos manejados en un sistema estabulado.

Objetivos específicos

1. Medir el nivel de producción de biogás a partir de la utilización de estiércol entero (en bola) de ovinos.
2. Cuantificar la producción de biogás a partir de la utilización de estiércol de ovino molido.

3. Determinar el nivel de producción de biogás a partir de la utilización de estiércol de ovino molido con tres diferentes porcentajes de paja.
4. Comparar la producción de biogás utilizando estiércol de ovinos criollos manejados en un sistema estabulado con estiércol de bovino lechero y gallinaza, en tres etapas de estudio.

Hipótesis

Las hipótesis plateadas en esta investigación para dar respuesta a las preguntas y cumplir con los objetivos son las siguientes:

Ha1: es posible generar biogás a través de la fermentación anaeróbica con el estiércol de ovinos.

Ha2: el acondicionamiento del estiércol (entero o molido) de ovinos tiene la influencia en la producción de biogás y en la rapidez de generación.

Ha3: el agregar paja de avena al estiércol de ovinos afecta la producción de biogás.

Ha4: Existen diferencias en la producción de biogás con la utilización de estiércol de ovinos, bovinos lecheros y gallinaza, en cuanto a la presentación que se le dé a la materia orgánica.

REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo, se hace una revisión de algunos estudios sobre la situación de los biocombustibles en el mundo y el caso de México particularizando sobre la producción de biogás a partir del estiércol de ovinos como respuesta al desabasto de energía considerando la disposición de los insumos necesarios para su producción y la relación que tiene esta fuente con el medio ambiente, lo económico y lo social.

¿Qué son los biocombustibles?

De acuerdo con la SAGARPA (2012), en México, *la Ley de Promoción y Desarrollo de los Biocombustibles*, los define de la siguiente manera:

Combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuacultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad.

Los biocombustibles se dividen en tres grupos:

- Bioetanol
- Biodiesel
- Biogás

Para el planeta, los combustibles de origen vegetal o animal tiene dos ventajas: ayudan a combatir el calentamiento global, porque son más limpios; y son una alternativa para disminuir los riesgos provocados por el agotamiento de las reservas de petróleo a nivel mundial, dado su carácter de recurso renovable.

Para México representan una forma de impulsar el desarrollo de sectores de la agricultura y la ganadería, ofreciéndoles oportunidades de negocio tanto a las empresas como a los pequeños agricultores. También son importantes para el país porque son una alternativa de largo plazo para el petróleo que, como recurso no renovable, cada día es más escaso y su extracción se hace más costosa.

Importancia de los Biocombustibles en el contexto mundial

De acuerdo con la SAGARPA (2012), en un reporte sobre los biocombustibles en el mundo señala que actualmente todas las energías renovables juntas proveen alrededor del 19% de la energía mundial. De ellas, la mayor parte está representada por la biomasa tradicional (principalmente leña: alrededor de 500 millones de familias en los países subdesarrollados la emplean para cocinar y calentarse y solo el 0.6% de la energía total proviene de los biocombustibles tal como se muestra en la siguiente gráfica.

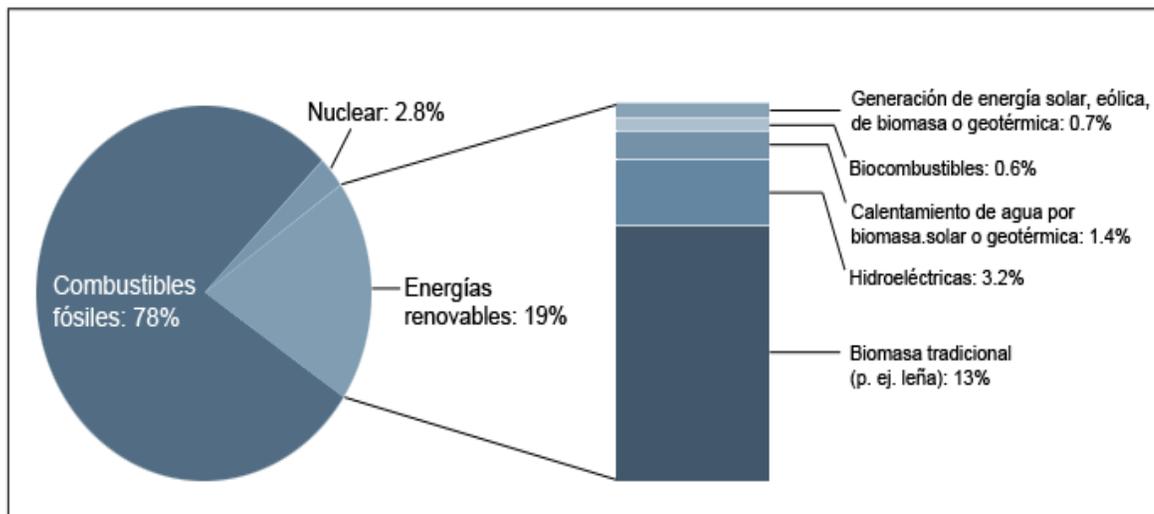


Figura 1. Participación de las Energías Renovables dentro del consumo final de Energía final, 2008.

Fuente: *Renewables 2010 Global Status Report*, p. 15.

A pesar de su aparente insignificancia como fuente de energía, su tendencia es a ocupar espacios cada vez más importantes. Por ejemplo, tan sólo en 2004 y 2008 la producción de bioetanol se sextuplicó, mientras que la de biodiesel se suplicó. Del total de las inversiones en energía renovable en el mundo, el 13% correspondió a los biocombustibles.

Esta es la distribución de las inversiones (cifras aproximadas):

- Energía eólica: 42%.
- Energía solar fotovoltaica: 32%.
- Biocombustibles: 13%.
- Energía y calentamiento geotérmico y de biomasa: 5%.

Alrededor de 85 países han implementado políticas y fijado metas delineadas para llevar a cabo programas de energías renovables. En 2009 algunos de estos países hicieron avances importantes en el uso de biomasa. El más notable es Suecia, en donde la biomasa generó por primera vez mayor energía que el petróleo. Existen plantas procesadoras de biocombustibles en alrededor de 50 países, y prácticamente todos están expandiendo su inversiones en este campo. Algunos ejemplos: Austria, 17%, Finlandia, 20% y Alemania, 5%.

Ventajas de los Biocombustibles

Menciona la SAGARPA (2012), las siguientes características de los biocombustibles:

- ✓ Son renovables

Los biocombustibles son una alternativa conveniente frente a los combustibles fósiles en primer lugar porque son renovables. Proviene de materias agrícolas o ganaderas, que pueden cultivarse o criarse.

- ✓ Son más limpios

Una de sus grandes ventajas es que son más biodegradables que los combustibles fósiles, por lo que son potencialmente menos dañinos en casos de derrames. Adicionalmente, aunque la idea está todavía a debate, se cree que emiten menos elementos contaminantes a la atmosfera al momento de quemarse.

- ✓ Generan empleos

Son una alternativa para fomentar la inversión y el empleo en la agricultura y en el campo. Algunos biocombustibles pueden emplear cultivos que se dan bien en tierras de baja productividad que actualmente están ociosas y, además, beneficiar a pequeños productores o cooperativas campesinas en condición de pobreza.

- ✓ Aprovechan materias tradicionalmente consideradas como desperdicio.

La basura, las grasas animales o usadas y el excremento animal son materias primas para producir biocombustibles. Además, para el caso de la basura y los excrementos, su aprovechamiento evita que se emitan gases de invernadero a la atmósfera con un alto potencial de contaminación.

- ✓ Su aprovechamiento impide que el metano se libere a la atmosfera, ya que es varias veces más contaminante que el CO₂ que se produce por quemar el biogás.

Desventajas de los biocombustibles

Según la SAGARPA (2012), menciona las siguientes desventajas de los biocombustibles:

- ✓ Balance energético y de contaminación atmosférica.

Es motivo de debate que tanta energía adicional que aportan los biocombustibles: para obtener este balance es necesario calcular cuánta energía se debió invertir en su producción, desde el diésel que consumieron los tractores empleados en su cultivo o en la producción de sus fertilizantes, hasta la energía consumida por la planta de procesamiento o su transporte al lugar final de su consumo.

Aunque son más limpios al quemarse, también hay dos posturas frente a que tanto contaminan los biocombustibles cuando se compara la cantidad de gases de efecto invernadero emitida en el ciclo completo de producción y consumo con la que se requiere para procesar y transportar combustibles fósiles.

Para algunos autores este balance es todavía negativo y las tecnologías de producción de biocombustibles necesitan mejorar mucho. Para otros, en cambio, aunque no niegan el beneficio y la conveniencia de los avances tecnológicos futuros, los biocombustibles son un negocio rentable hoy.

Sin embargo, ambos bandos coinciden en que es necesario contar con fuentes alternativas de energía frente al agotamiento de las reservas de petróleo en el mundo, y que es necesario seguir experimentando y acumulando conocimientos en la producción de biocombustibles.

- ✓ Efectos sobre la biodiversidad

Se ha señalado que en la necesidad de contar con combustibles alternativos puede llevar a la ocupación de tierras boscosas o selváticas para la producción de cultivos energéticos.

En países como Malasia o Sumatra grandes extensiones de tierra fueron deforestadas para plantar palma de aceite, materia prima de la producción de biodiesel. En estos casos no

solo se perdió la biodiversidad vegetal, sino que con ella se perdieron poblaciones de fauna local.

✓ Efectos sobre el precio de los alimentos

Dedicar tierra cultivable a la producción de biocombustibles puede disminuir la destinada a producir alimentos para humanos y animales, impactando así su cantidad y elevando su precio.

Frente a ello, se están buscando nuevas formas de producir biocombustibles que no afecten la matriz alimentaria mediante la generación de tecnologías capaces de aprovechar desechos agrícolas y cultivos no destinados a la alimentación.

Procesos para la obtención de Biocombustibles: Biodiesel, Bioetanol Y Biogás

Producción de Biodiesel

De acuerdo con la SAGARPA (2012), señala que para la producción de biodiesel a partir de plantas oleaginosas, como el cártamo, el girasol o las recomendadas por las políticas públicas mexicanas: la higuera, la jatropha y la palma de aceite. Primero debe obtenerse el aceite contenido en sus semillas, ya sea por medio del prensado mecánico o mediante la extracción química empleando solventes. En cambio, si se trata de aceite de cocina usado, debe someterse a una limpieza que remueva todos los sobrantes de alimento, calentándolo y colándolo. Si se trata de aceite a partir de grasa animal, también debe de pasar por un proceso de limpieza y estabilización de su contenido de ácidos grasos libres.

Una vez que se tiene el aceite base limpio, se le somete al proceso principal, conocido como transesterificación, en el que se separan sus componentes para obtener biodiesel y glicerina. Este proceso se realiza mezclando el aceite con una pequeña parte de metanol y otra de algún catalizador base (como el hidróxido de sodio – NaOH-), mientras se calienta y se mueve. Al final de este proceso, la glicerina, que es más pesada se va al fondo del contenedor, mientras que el diésel flota en la parte superior. Para finalizar el proceso, el biodiesel es sometido a procesos de limpieza y refinación hasta que alcanza los estándares adecuados.

Producción de Bioetanol

SAGARPA (2012), señala que el etanol puede producirse a partir del etileno, que es un derivado del petróleo, o del procesamiento de materia orgánica. Al etanol producido de materia orgánica se le conoce como bioetanol. El bioetanol puede producirse de varias fuentes vegetales. Dependiendo del tipo de fuente, el bioetanol se clasifica en tres generaciones.

1. Bioetanol de primera generación proviene de cultivos que pueden ser empleados también para la alimentación humana o animal y que se procesan a partir de los métodos que tradicionalmente se han empleado para producir alcohol. Los cultivos adecuados son los que tiene altas concentraciones de azúcares, como la caña de azúcar, el sorgo dulce o la remolacha; o altas concentraciones de almidones, como el maíz, la yuca o la papa. De conformidad con la *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*, en este sitio se tratarán solamente los cultivos y la tecnología de esta primera generación.
2. Bioetanol de segunda generación es el que se produce a partir de materias primas que pueden convertirse en celulosa, como los residuos de la madera, o de cultivos alimenticios como los desechos del maíz y el trigo o el bagazo de caña de azúcar. Su procesamiento requiere de tecnologías avanzadas y aunque ya hay algunas plantas productoras en el mundo, todavía está en fase experimental.
3. Bioetanol de tercera generación son los que provienen de fuentes específicamente cultivadas para producir biocombustibles, como las algas marinas. Aunque son las que prometen una mayor productividad para generar bioetanol, aún se encuentran en fase experimental y no están para producir en cantidades industriales de una manera rentable.

Biogás

El principio de producción de biogás es muy eficiente y en opinión de Andreas Michel, experto en energía de la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (Deutsche Gesellschaft Fur Technische Zusammenarbeit) o GTZ, por las siglas en alemán): “el estiércol que generan diariamente dos o tres vacas, con el gas metano que contiene, es suficiente para cocinar durante cinco horas o iluminar una vivienda”. Su organización

ha apoyado, en los últimos años, la construcción de varios centenares de plantas de biogás en Bolivia y Ruanda, entre otros países. La mayoría de las instalaciones domésticas de biogás se encuentran en China, Botswana e India.

Producción de Biogás a partir de la Basura

De acuerdo con la SEMARNAT (2012), en México diariamente se generan más de 80 mil toneladas de basura. Según el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), si aprovecháramos toda esa basura para generar electricidad, solamente con la acumulada hasta el año 2003 se podrían generar 400 MW de electricidad.

Esto representa una oportunidad para aquellos municipios que no cuentan con rellenos sanitarios o que, si los tienen, no están aprovechando el gas para generar electricidad. Según el estudio del IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas), una de las razones por las que los municipios no han implementado esta solución es por el desconocimiento de sus oportunidades y beneficios. Además, una vez creados los rellenos, se puede solicitar el apoyo financiero internacional a través de la comercialización de bonos de carbono. Según el mismo estudio del IIE, México tiene un potencial para obtener hasta 50 millones de dólares anuales mediante la venta de bonos de carbono.

Producción de Biogás a partir de Estiércol

SAGARPA (2012), menciona que la producción de biogás a partir de estiércol se trata de un sistema de manejo del estiércol que es ecológicamente más limpio, a través del cual se genera biogás(que puede transformarse en energía eléctrica) y agua residual, con un alto grado de nutrientes para ser reutilizada en la agricultura.

Además de contribuir a un manejo del estiércol que es ecológicamente más limpio, genera ahorros en el gasto por energía eléctrica e, incluso, puede producir ganancias al vender los excedentes de electricidad a la Comisión Federal de Electricidad y obtener ingresos adicionales por la venta de bonos de carbono en el mercado internacional.

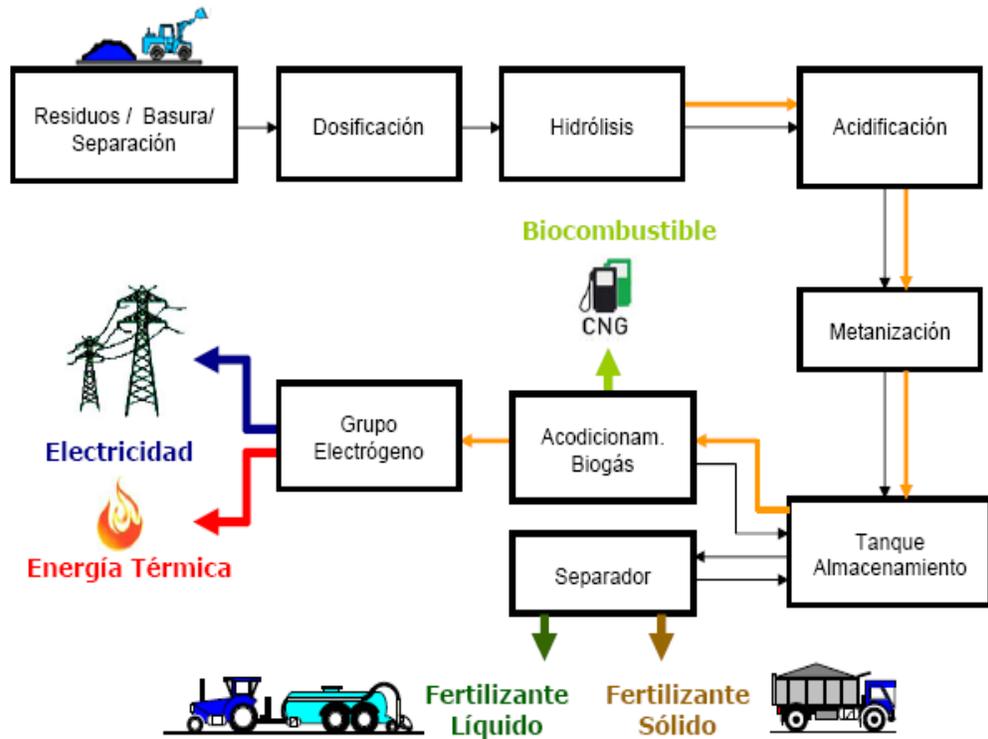


Figura 2. Proceso para la Producción de Biogás

Fuente: López 2012.

Historia del Biogás

Deublein y Steinhauser (2008), mencionan que el comienzo de la historia del biogás se puede fijar en unos 5000 años atrás. Fuentes muy antiguas indican que el uso de 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.

También hay datos que están basados en relato del viaje de Maro Polo a China (Catai) (1278-1295) en el libro “Divisament de 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, esta 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 a.C.

Brakel (1980) y Lusk (1998), citan que dentro de lo más reciente, en el siglo XVI en Persia, hay constancia escrita del uso del biogás.

Sathianathan (1975) y Deublein y Steinhauser (2008), mencionan que en estos tiempos modernos, existe la disputa entre dos ciudades para determinar quien ostenta el honor de poseer el primer digestor anaerobio para biogás de la era moderna, ya que si bien numerosos autores comentan que la primera unidad de digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de aguas residuales fue construida en la India en 1859, en el asilo-hospital de leproso de Matunga, cerca de Mumbai (antes de 1995 se llamaba Bombay) en la India.

Dejando a un lado los hechos más o menos anecdóticos antes comentados, la ciencia del proceso de producción de biogás es tan vieja como puede ser la investigación científica e incluye los nombres de la mayoría de los investigadores más famosos del mundo. Haciendo una recapitulación de los numerosos estudios sobre este proceso.

Helmont (1639), realizó la primera anotación científica sobre el biogás, quien determino que la descomposición de la materia orgánica producía unos gases que eran inflamables. Shirley en 1667, menciona el descubrimiento del biogás o del gas de los pantanos, identificándolo como el causante de los denominados “fuegos fatuos”. R. Boyle (1682) y Pine (1971), predijeron la posibilidad de obtener un gas a partir de residuos animales y vegetales en descomposición. Volta (1776), publica en una carta “aaria infiammabile native delle Paludi”, que en el lago Como, se forma un gas que es explosivo cuando se agitan los sedimentos, y además concluyo que había una correlación directa entre la cantidad de material orgánico en descomposición, en el fondo de la masa de agua y la cantidad de gas inflamable y que el principal compuesto del gas natural (gas de los pantanos) era el metano Stafford y Hawkes, (1980). Dalton (1804), describe la estructura química del metano y lo asocia con el biogás. Humphry Davy (1808), produce gas metano en un laboratorio con estiércol de ganado. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás. Labor que continúa, en parte, su alumno y luego célebre físico inglés Faraday.

Avogadro (1821), cita por primera vez la estructura química final del metano (CH_4). A la vez, 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. Reiset (1856), encontró que el CH_4 se libera al descomponer el estiércol amontonado y propuso que este proceso se estudiaría para ayudar a explicar la descomposición del material orgánico en general. Becham (1868), dijo que una población mixta de microorganismos convertía el etanol en metano, y que algunos de los productos finales formados durante el proceso de fermentación dependían del sustrato. Propoff (1875), menciona que la formación de biogás solo se producía en anaerobiosis, asimismo estudio la influencia de la temperatura en la formación de metano. Él encontró que los sedimentos de los ríos podían formar biogás a temperaturas tan bajas como 6°C . Con temperatura creciente del gas formado no cambiaba con la temperatura creciente hasta 50°C la producción de gas era estimulada. También se observó que la composición del gas formado no cambiaba con la temperatura. Herter (1876), reportó que el acetato encontrado en el agua residual forma cantidades estequiométricas de metano y dióxido de carbono en cantidades iguales. Pasteur (1884), hizo producir biogás a partir del estiércol de caballo recogido de las calles de París. En ese mismo año, junto con su alumno Ulysse Gayon o Gavon obtuvo 100 litros de biogás por metro cúbico de estiércol de biogás al mezclar estiércol y agua a 35°C , sin la presencia de oxígeno. En ese mismo año otro investigador francés llamado Pastnier presentó ante la Academia de Ciencias de Francia el primer trabajo sobre la producción de metano a partir de residuos de granjas. Omelianski (1886), realizó la comprobación de la formación de metano con el estiércol de vaca. Cameron (1890), diseñó una gran fosa séptica para la ciudad inglesa de Exeter y unos años después alimentó la red de alumbrado con el gas obtenido (1895-96). Según McCabe y Eckenfelder (1957), publicó en los años de 1895-96, en la población de Exeter (RU) que las lámparas del alumbrado público comenzaron a ser alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos de su alcantarillado. Constituyendo esto, el primer uso dado al gas metano obtenido por fermentación. Barker (1956), menciona que a finales de siglo XIX fue demostrada la presencia de microorganismos involucrados en el proceso de

fermentación mecánica. A finales del mismo siglo se construyen en el sur de China las primeras plantas de biogás, tal y como se conocen actualmente. Shengon (1901), describió detalladamente las características morfológicas de las metanobacterias y sugirió un concepto relativamente claro de su capacidad de conversión en metano. Travis (1904), intentó llevar a cabo un proceso de dos etapas en el que combinó la purificación del agua de desecho con la producción de metano. Sohngen (1906), acumuló acetato en un proceso de dos etapas. Encontró que el metano se forma a partir de tres materiales básicos: el formato, el hidrógeno y el dióxido de carbono. En ese mismo año, el técnico Imhoff comenzó la construcción de unidades de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en Ruhr, Alemania. Él instaló el llamado “tanque Imhoff” con espacios separados para la sedimentación y la digestión. El tiempo de residencia del biodesecho fue de 60 días.

Greeley y Velzy (1936), mencionan que en el año de 1907, en la colonia de leproso cerca de Mumbai (India) comenzó a operar un motor utilizando el gas del lodo. Está claro que era una pequeña instalación y que no llevó a ningún tipo de desarrollo extenso en ese momento.

En Europa, los primeros digestores para obtener biogás a partir de residuos orgánicos se instalan en Gran Bretaña en 1911. Omelianski (1916), realizó por primera vez un linaje de metanobacterias. En 1918, los ingleses se interesan sobre la producción de metano a partir de residuos de granja.

Durante las décadas de los años 20 y 30 del siglo XX, se realizan numerosas experiencias tanto a nivel de laboratorio como de plantas piloto. En muchos casos ya se utilizaban los lodos de aguas residuales como alimento de los digestores. Guorui (1920), construyó en China un digestor de 8 metros cúbicos de capacidad y fundó la Compañía “Guorui Biogas Lamp” Boruff y Buswell (1930), publican artículos sobre la producción de metano con diversos residuos. También Jacobs y Levine del estado de Iowa trabajan sobre la generación de un combustible gaseoso a partir de las enormes cantidades de residuos celulósicos de las granjas. Tietjen (1975), menciona que en el año de 1951 se comienza el desarrollo del biogás en Alemania por diversos equipos. Ross (1954), dijo que en Richmond (USA), el proceso de digestión se estaba realizando con residuos comunales con lodo. Al parecer una instalación cerrada estaba funcionando dirigiendo los residuos en Chicago (USA). Chung (1965), publicó los diseños para los digestores fermentadores de

tamaño familiar y el uso posterior del lodo para fertilizar y cultivar *Chlorella*. Bates (1957), menciona como modifico su coche para hacer funcionar con biogás, consiguiendo que siguiera funcionando durante 17 años más. Campos (2001), cito que durante los años de la década de los 60 se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir del estiércol de bovino en la India, con el doble objetivo del aprovechamiento energético y el mantenimiento de las propiedades fertilizantes del digerido. El mismo autor menciona que para la década de los años 70 en China se impulsa la construcción de digestores, mediante programas de ámbito nacional. El 1977 había más de 5 millones de digestores anaerobios en China, debido al parecer, por la mayor economía de los materiales empleados, lo que reducía los costos de inversión Pfeffer y Smill (1974). En la misma cita se menciona que en año de 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 Medio ambiente. 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 kWh 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 para la propia planta.

Nepal es el país del mundo que tiene mayor proporción de plantas de biogás por habitante.

¿Qué es el Biogás?

FIRCO (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 producto útil de este proceso y que mediante una sencilla adaptación puede ser utilizado en cualquier cocina o calefactor.

Métodos de obtención del Biogás.

Varnero (2011), cita que en una fermentación anaeróbica, la materia orgánica es catalizada 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, solo 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 acetofica. La fermentación anaeróbica se puede aplicar para la recuperación de biocombustibles (e.g. hidrogeno y butanol) y productos bioquímicos (nisina y ácido láctico).

Aplicaciones del Biogás

Según Cheung (2012), alrededor de 3,200 millones de personas no tienen acceso a fuentes de calor modernas. Cocinan con “fuegos abiertos”, nocivos para la salud y para el clima y en su estudio plantea biogás de producción de propia como una posible solución a este problema.

El mismo autor señala que en muchos países falta la infraestructura para suministrar calor a los habitantes de las regiones más apartadas. Personas a las que no les queda más alternativa que la de quemar el combustible que tengan más a mano, sobre todo de madera. Sin embargo, la combustión de la madera genera partículas nocivas para la salud y libera CO₂ a la atmosfera.

Una alternativa pasa por el empleo de biomasa en las denominadas plantas de biogás domésticas. A través de la fermentación de los residuos orgánicos de personas y animales se obtiene gas metano que puede emplearse para cocinar, caldear, iluminar o para propulsar generadores para producir electricidad.

La ventaja de las pequeñas instalaciones de biogás reside en el hecho de que producen en el entorno en el que la energía acaba siendo empleada. Es decir, no hay que tender largas y costosas líneas para transportar la energía, las instalaciones se ubican junto a las casas, están construidas de forma sencilla, son fáciles de manejar y el combustible es de producción propia.

De acuerdo con la SAGARPA (2012), el gas producido a partir del estiércol de los animales puede emplearse para generar electricidad para cubrir una parte o la totalidad de las necesidades de energía de las granjas ganaderas, permitiendo ahorros y maximizando las utilidades.

Hilbert (2013), menciona que la aplicación del biogás en el área rural ha sido importante dentro de ella se pueden diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o al productor medio de los países con sectores rurales de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía.

El segundo tipo de tecnología está dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos. El objetivo está buscando en este caso es brindar energía y solucionar graves problemas de contaminación. Los digestores de alta eficiencia desarrollados para esta aplicación tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento

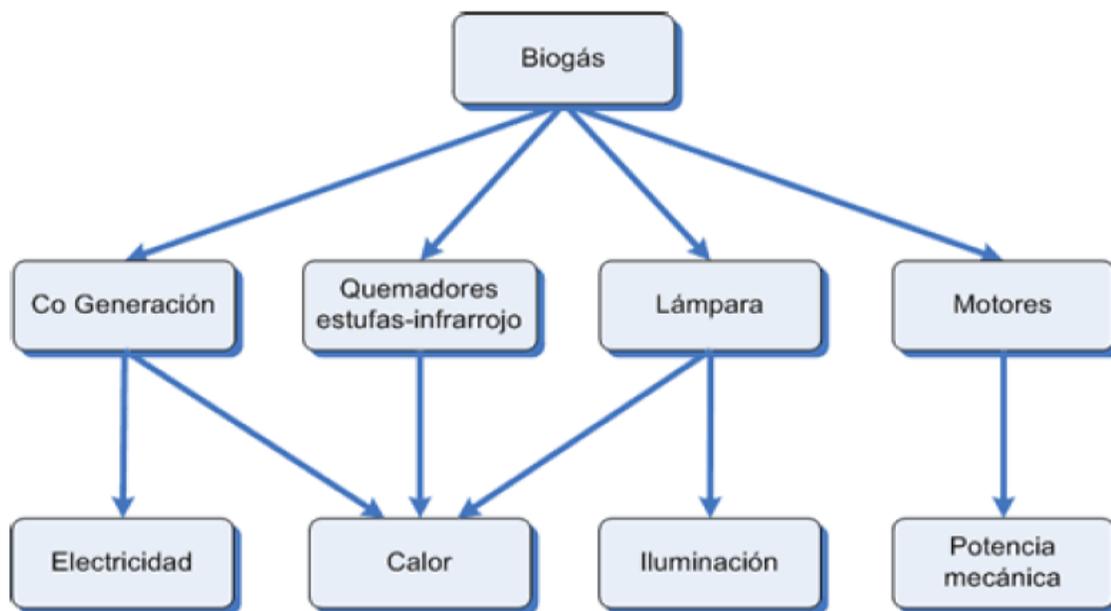


Figura No. 3. Usos del Biogás

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

De acuerdo con la FAO (2011), la digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H_2O_2).

La misma cita menciona que utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaeróbica más de 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose solo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.

Hilbert (2013), 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.

FAO (2011), cita que en la digestión anaeróbica, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo.

El proceso anaeróbico se clasifica como fermentación anaeróbica o respiración anaeróbica dependiendo del tipo de aceptores de electrones.

Fermentación Anaeróbica

De acuerdo a la FAO (2011), en una fermentación anaeróbica, la materia orgánica es catalizada 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, solo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato se conserva.

La misma cita menciona 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 podemos 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 los bovinos. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas.

Etapas del proceso de la Fermentación Anaeróbica

Según Middlebrooks et al., (1982), describen brevemente en cuatro etapas el proceso de digestión anaeróbica.

- a) Hidrolisis: este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles (lípidos, proteínas y carbohidratos) en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización en anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.
- b) Acidogénesis: los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles (acetato, propionato, butirato, etc.), alcoholes y otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrogeno y dióxido de carbono). Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas.
- c) Acetogénesis: las bacterias son microorganismos que viven en estrecha colaboración con las Archaeas metanogénicas. Estos microorganismos son capaces de transformar los ácidos grasos resultantes de la etapa anterior en los sustratos propios de la metanogénesis (acetato, dióxido de carbono e hidrogeno).
Según Moreno (1991).
- d) Metanogénesis: una vez que se han formado ácidos orgánicos, dos nuevas categorías de bacterias entra en acción, aquellos que convierten el acetato en metano y dióxido de carbono (acetoclasticos) y aquellas que convierten el acetato en metano y dióxido de carbono y el hidrogeno para producir metano y agua (hidrotrofos). Esta fase de la digestión anaeróbica es fundamentalmente para conseguir la eliminación de materia orgánica, ya que los productos finales no contribuyen a la demanda bioquímica del oxígeno (DBO) ni a la demanda química de oxígeno del agua (DQO) del medio. A diferencia de lo que ocurre con la fase acidogénica, el metabolismo de estas bacterias es más lento y además, son mucho más sensibles a distintas condiciones ambientales, tales como pH y temperatura.

Hilbert (2013), menciona lo siguiente para la comprensión de estas fases (cuadro 1):

Cuadro No. 1 Fase Acidogénica y Metanogénica

FASE ACIDOGENICA	FASE METANOGENICA
Bacterias facultativas(pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno)	Bacterias anaeróbicas estrictas (No pueden vivir en presencia de oxígeno.)
Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva).	Reproducción lenta(baja tasa reproductiva)
Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura.	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura.
Principales metabolitos, ácidos orgánicos.	Principales productos finales, metano y dióxido de carbono.

Fuente: Hilbert, 2013

Bacterias implicadas en la Fermentación Anaeróbica

De acuerdo con la FAO (2011), los microorganismos involucrados en cada fase de la fermentación anaeróbica son:

Las especies de microorganismos involucrados en el proceso varían dependiendo de los materiales que serán degradados. Los alcoholes, ácidos grasos, y los enlaces aromáticos pueden ser degradados por la respiración anaeróbica de los microorganismos.

Estos utilizan, entre otros nutrientes, el nitrato (Paracoccus denitrificans, Pseudomonas stutzerii, azufre (Desulfonema limícola), carbonato (Acetobacterium woodi, Clostridium aceticum, Methanobacterium thermoautotrophicum, fumarato (Escherichia coli, Wolinella succinogenes o Fe (III) (Alteromonas putrefaciens) como aceptores de electrones, por lo que pueden denominarse reductores de nitrato, reductores de sulfato, etc.

Sin embargo otros microorganismos también compiten por el nitrato como aceptor de electrones, por lo que el nitrato se reduce rápidamente a amonio y el nitrato como reductor juega un papel secundario en los procesos de fermentación.

Los reductores de sulfato participan activamente en la degradación de compuestos con poco oxígeno, tales como el lactato y etanol.

En la primera y segunda fase de la degradación, participan bacterias de al menos 128 órdenes de 58 especies y 18 géneros. Las especies que se presentan principalmente son Clostridium, Ruminococcus, Eubacterium y Bacteroides.

En la tercera y cuarta fase de la degradación, se encuentran principalmente bacterias metanogénicas. En la actualidad, se han identificado 81 especies, de 23 géneros, 10 familias y 4 órdenes.

Además, existen diversos microorganismos que pertenecen al sistema ecológico de un bioreactor y que participan indirectamente en la degradación. Por ejemplo, Staphylococcus, especie que se desarrolla con frecuencia en los digestores, puede provocar riesgos para la salud del personal que opera el digestor si no se toman las medidas sanitarias necesarias.

En las cuatro fases de la degradación, las especies Acetobacter y Eubacterium tienen una participación similar en el proceso.

Bacterias que participan en la etapa de la Hidrolisis

Los microorganismos de muchos géneros son los responsables de la hidrolisis. Entre estos destacan: Bacteroides, Lactobacillus, Propionibacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Magasphaera, Bifidobacterium.

Bacterias que participan en la etapa de Acidogénesis

La mayoría de los microorganismos acidogénicos también participan de la hidrolisis. 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.

Bacterias que participan en la etapa de Acetogénesis

Estas bacterias solo pueden sobrevivir en simbiosis con el género que consume hidrógeno. Todos los microorganismos acetogénicos tienen un periodo 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.

Bacterias que participan en la etapa de Metanogénesis

La última fase de la descomposición anaeróbica se encuentra 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 auto fluorescencia 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*, *Methenospirillum hungatii*, y *Methanosarcina*.

Especies metanotróficas

Las especies metanotróficas (especies que consumen metano) se encuentran presentes en todas partes, pero no son deseables en una planta de producción de biogás. La mayoría de estos son aeróbicos. Estos microorganismos son el agua y el dióxido de carbono.

Los metanotróficos aeróbicos degradan aproximadamente el 17% de todo el metano en la atmósfera. Además de estos, existe otro grupo de metanotróficos, que es capaz de consumir.

Cuadro No. 2. Bacterias que participan en el proceso de la Fermentación durante las cuatro fases.

Taxonomía	Especies	Descripción	Metabolismo
Genero : Acetobakterium	A. Wodii A. Paludosum	El género Actobacter, comprende un grupo de bacilos Gram negativos, móviles que realizan una oxidación completa de alcoholes, produciendo una acumulación de ácidos orgánicos como productos finales.	Reduce autotroficamente compuestos polímeros, oligómeros, monómeros y CO ₂ utilizando como fuente de electrones. Estos microorganismos hacen posible la descomposición de los ácidos grasos y compuestos aromáticos.
Género: Eubacterium	E. rectale E. siraeum E. plautii E. cylindrois E.brachy E.desmolans E. callandrer E.limosum	El género Eubacterium consiste en un grupo de bacterias anaeróbicas obligadas Gram-positivas.	La mayoría de las Eubakteria sacarolíticas producen butirato como el principal producto de su metabolismo. Muchas especies son capaces de descomponer sustratos complejos a través de mecanismos especiales. Algunas especies se desarrollan autotroficamente, por lo tanto son capaces de cumplir funciones específicas en la descomposición anaeróbica.

Fuente: Insam, et al, 2009

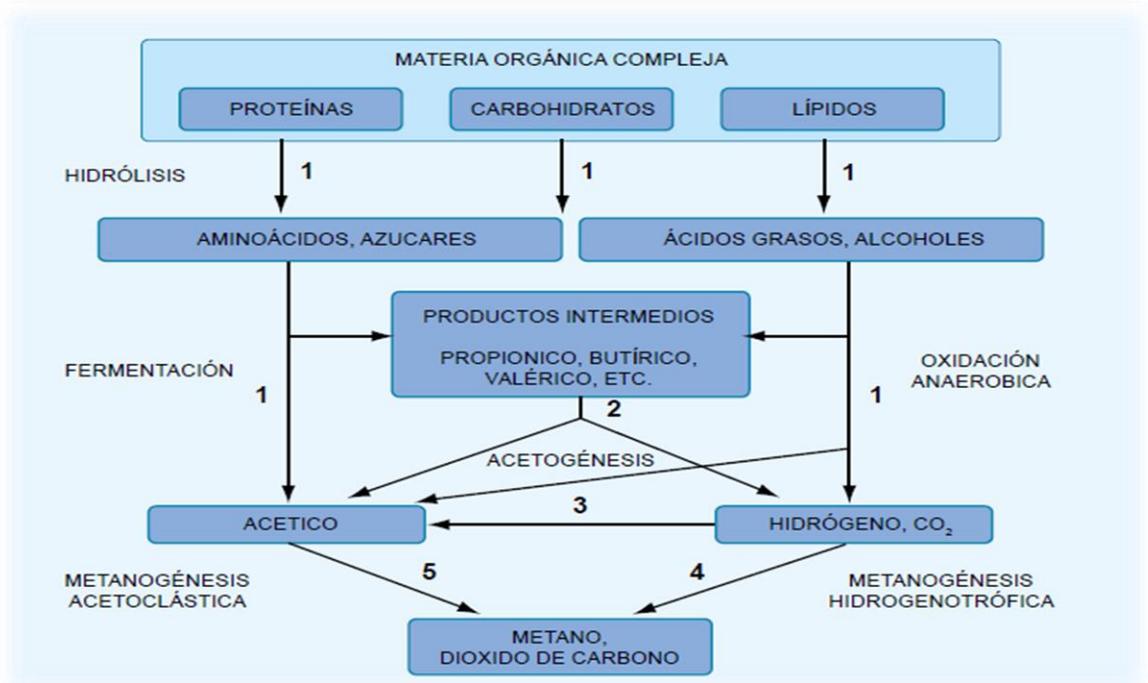


Figura No. 4. Esquema de reacciones de la Digestión Anaeróbica de materiales

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

Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991.

Factores ambientales en el proceso Metanogénico (producción de Biogás)

Según la FAO (2011), es importante examinar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso. Debido a esto, la biotecnología anaeróbica requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales.

Algunas de estas condiciones ambientales son: temperatura (mesofílica o termofílica), tipo de materias primas, nutrientes y concentración de minerales traza, pH (generalmente cercano a la neutralidad), toxicidad y condiciones redox óptimas.

De acuerdo con la FAO (2011), estas condiciones se discuten a continuación:

Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

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

Cuadro No. 3. Tipos de residuos.

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

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Las características bioquímicas que presentan 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 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.

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostaje) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina. 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.

Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias. Esto es debido al sin número de factores que pueden intervenir en el proceso, que hacen difícil la comparación de los resultados.

El contenido de agua de diversas materias primas varía entre 10 a 90% del peso fresco del residuo, dependiendo de la edad y órgano del residuo, formas de obtención. Los componentes orgánicos de estos residuos son variados y corresponden aproximadamente a un 50% del peso fresco, en función del contenido de agua y de las cenizas. Los principales grupos que se distinguen son: carbohidratos (50% del total de la materia orgánica seca), compuestos nitrogenados (20%), lignina (10 a 40%) y el resto fracciones como cera, resinas, grasas. La composición promedio de la materia orgánica seca es: 48% C; 44% O; 7% H; 2%H.

Los minerales presentes como calcio: potasio, magnesio, fosforo, azufre y elementos trazas son del orden del 1 a 10% del peso seco.

**Cuadro No. 4. Composición química de diversos residuos de Origen Animal y Vegetal
(valores promedio, base seca).**

Materia prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa (%)	Lignina (%)	Cenizas (%)
			Hemicelulosa (%)		
Paja de trigo	1,10	2,10	65,45	21,60	3,53
Paja de centeno	9,62	5,42	59,45	12,70	12,31
Paja de arroz	2,35	12,26	30,51	10,61	12,55
Pasto verde	8,05	4,94	57,22	9,80	19,99
Alfalfa	10,41	12,81	36,79	8,95	10,30
Hojas secas	4,01	3,17	32,78	29,66	4,68
Caña de azúcar		4,50	35,40	10,30	6,50
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,49	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Equino	2,70	5,00	40,50	35,00	17,80
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95
Caprino	2,90	4,70	34,00	33,00	26,40

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Cuadro No. 5. Rango de niveles de nutrientes en diversos residuos de Origen Animal y Vegetal.

Materia prima	C (%)	N (%)	P₂O₅ (%)	K₂O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Excretas	17,4 -40,6	0,3 -2,0	0,1 -1,5	0,10	0,35	0,13
Bovino	17,4 -40,0	1,1-2,5	0,4 -4,6	0,30	0,09	0,10
Porcino	35,0 -52,0	1,0 -2,0	0,2 -1,5	2,30		
Caprino	35,0 -52,0	0,3 -0,8	0,4 -1,6	0,35	0,15	0,12
Equino	35,0 -46,0	0,3 -0,6	0,3 - 1,0	0,15	0,33	
Ovino	23,0 -35,0	1,0 -1,9	0,9 - 1,8	2,10	0,45	0,15
Conejos	28,0 -35,0	1,4 -2,0	2,0 -2,8	1,40	0,80	0,48
Aves	29,0 -41,0	0,6 -0,8	0,5 0,8	1,10	0,80	
Patos	17,4- 41,0	0,6-0,8	0,5-0,8	1,10	0,80	
Humanas	2,5	0,8 -1,0	0,5	0,30		
Mezclas:						
Porcino+paja	20,0 -22,0	0,3 -0,5	0,24	0,03	0,20	
Bovino+paja	44,0 -46,0	0,3- 0,5	0,79	1,55	0,30	
Rastrojo:						
Caña de maíz	30,0 -40,0	0,8 -1,8	0,4 -0,6	2,40	0,50	0,49
Paja de avena	16,0 -46,0	0,53	0,70	0,40	0,26	0,16
Paja de avena	22,0 -29,0	0,53	0,40	0,30	0,46	
Paja de cebada	58,0	0,64	0,19	1,07	0,33	0,33
Paja de arroz	40,0 -42,0	0,64	0,60	0,40	0,60	
Paja de haba	28,0 -33,0	1,5 -1,9	0,40	2,30	1,35	
Hojas secas aserrín	35,0- 40,0	1,00	0,30	0,20	2,00	
	44,0	0,06	0,01	0,01		

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

En términos generales, se pueden clasificar los sustratos en cuatro clases en función de su apariencia física, nivel de dilución, grado de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno.

Los sustratos de clase 1 pueden degradarse eficientemente en digestores Batch o por lotes. Los sustratos de la clase 2 son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua. Por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO (demanda bioquímica de oxígeno) menor, los sustratos de clase 3 deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio. En cuanto a los sustratos de clase, 4 debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia, los cuales se mencionan en el siguiente cuadro.

Cuadro No. 6. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura domestica Estiércol solido Restos de cosecha	Menos de 20% ST 40-70 % Fracción Orgánica
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces animales	100-150 g/l DQO 5-10% ST 4-8% SV
Fluidos con alto contenido de solidos suspendidos (SS)	3	Heces de animales de cría y levante diluido con agua de lavado. Aguas residuales de mataderos	a. g/l DQO 1-2 g/l SS
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias. Aguas negras	a. g/l DQO 4.500 g/l DQO

Fuente: Esguerra, 1989

La degradación o descomposición de la materia orgánica es compleja y difícil de tratar en detalle, todos los problemas que se presentan. Simplificando esta situación, las fuentes carbonadas más utilizadas por los microorganismos quimiotróficos son los glúcidos o carbohidratos y de éstos compuestos orgánicos, principalmente las hexosas, las cuales son degradadas por diferentes vías metabólicas. Los fragmentos que alimentan estos procesos cíclicos, por una parte, dan origen a cadenas carbonadas que participan en la formación de nuevas células microbianas y, al mismo tiempo, son usadas en las oxidaciones y reducciones biológicas que están ligadas a la síntesis de moléculas ricas en energía. Si estos procesos tienen lugar en un medio con niveles de oxígeno ilimitado, corresponden a procesos de oxidación biológica o respiración aeróbica con desprendimiento de CO₂ y de energía equivalente a la mineralización total del substrato orgánico utilizado por los microorganismos. Si por el contrario, el nivel de oxígeno en el sistema es bajo, determinando condiciones anaeróbicas, corresponde a procesos de reducción biológica o fermentaciones.

En este caso, la liberación de energía y desprendimiento de CO₂ son menores que la obtenida en la respiración aeróbica. Además según el tipo de fermentación se desprenden otros gases como: metano (CH₄), hidrógeno, o producción de otros compuestos como alcoholes, ácidos orgánicos, entre otros.

Cuadro No. 7. Producción de Biogás por tipo de Residuo Animal.

Estiércol	Disponibilidad Kg/día *	Relación C/N	Volumen de Biogás	
			m ³ /Kg/húmedo	m ³ /día/año
Bovino(500Kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino(50Kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves(2Kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino(32Kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino(50Kg)	2.00	40:1	0.5	0.100
Equino(450Kg)	10.00	50:1	0.4	0.400
Conejo(3Kg)	0.35	13:1	0.06	0.021
Excretas Humanas	0.40	3:1	0.06	0.025

Fuente: Varnero y Arellano, 1991. * El dato se refiere a la cantidad estimada de estiércol que es posible recolectar de todo el producto.

Cuadro No. 8. Producción de Biogás a partir de Residuos Vegetales.

Residuos	Cantidad Residuo Ton/ha	Relación C/N	Volumen de Biogás	
			m ³ /Ton	m ³ /Ha
Cereales				
(paja)				
Trigo	3.3	123:1	367	1200
Maíz	6.4	45:1	514	3300
Cebada	3.6	95:1	388	1400
Arroz	4.0	58:1	352	1400
Tubérculos(hojas)				
Papas	10.0	20:1	600	6000
Betarragas	12.0	23:1	501	6000
Leguminosas(paja)				
Porotos	3.2	38:1	518	1650
Habas	4.0	29:1	608	1400
Hortalizas(hojas)				
Tomate	5.5	12:1	603	3300
cebolla	7.0	15:1	514	3600

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Relación carbono/nitrógeno de las materias primas

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 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 es 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por falta de nitrógeno, pero el periodo 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.

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, C/N =30:1. Por lo tanto, cuando ni se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas.

Sobre la base del contenido de carbono y de nitrógeno de cada una de las materias primas puede calcularse la relación C/N de la mezcla aplicando la siguiente fórmula:

$$k = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots Cn * Qn}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots Nn * Qn}$$

Datos:

K= C/N de mezcla de materias primas

C= % de carbono orgánico contenido en cada materia prima

N= % de nitrógeno orgánico en cada materia prima

Q= Peso fresco de cada materia, expresado en kilos o toneladas

Desde el punto de vista práctico es aconsejable manejarse con medidas volumétricas y determinar los parámetros: Densidad (D), Masa (M) y Volumen (V) a partir de la fórmula:

D= M/V, expresando la masa en kilos o toneladas y el volumen en litros o metros cúbicos.

Cuadro No. 9. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Materiales	(%) C	(%) N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1
Residuos vegetales			
Paja de trigo	46	0.53	87:1
Paja de cebada	58	0.64	90:1
Paja de arroz	42	0.63	67:1
Paja de avena	29	0.53	55:1
Rastrojos de maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
Hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales (ST). El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se

efectuó satisfactoriamente. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales.

Para calcular el volumen de agua que se debe de mezclar con la materia prima para dar la proporción adecuada de sólidos totales, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales de la materia prima fresca.

Cuadro No. 10. Datos promedios sobre el contenido de solidos totales de diversos residuos.

Materias Primas	% Solidos Totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4-56.2
Porcinos	15.0-49.0
Aves	26.09-2.0
Caprinos	83.0-92.0
Ovejas	32.0-45.0
Conejos	34.7-90.8
Equinos	19.0-42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo de maíz	77.0
Paja de trigo	88.0-90.0
Paja de arroz	88.8-92.6
Leguminosas (paja)	60.0-80.0
Tubérculos(hojas)	10.0-20.0
Hortalizas(hojas)	10.0-15.0
Aserrín	74.0-80.0

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

Según Varnero y Arellano (1991), mencionan un ejemplo, en el caso del estiércol de bovino fresco, suponiendo que tiene un 20% de sólidos totales y se quiere diluir esta carga a un 5% de sólidos totales, para saber cuánta agua se debe agregar por kilo de excretas frescas, se realiza el siguiente cálculo:

$$\% \text{ S. T. (carga diluida)} = \frac{1 \text{ kg excreta} * \% \text{ S. T. excreta fresca}}{1 \text{ kg excreta fresca} + \text{agua agregada}}$$

$$0.05 = \frac{1 * 0.20}{1 + W \text{ agua}}$$

$$0.05 + 0.05 W \text{ agua} = 0.20$$

$$W \text{ agua} = \frac{0.15}{0.05} = 3 \text{ litros/ kg excreta fresca}$$

Sólidos Volátiles (S. V.). Es aquella porción de sólidos totales que se libera de una muestra, volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600° C.

Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano.

Temperatura

Según Varnero y Arellano (1991), mencionan que 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.

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden gatillar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25° C), mesófilos (entre 25 y 45° C) y termófilos (entre 45 y 65° C) siendo la velocidad máxima específica de crecimiento mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación.

Cuadro No. 11. Rangos de Temperatura y Tiempo de Fermentación Anaeróbica.

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°	75 80°C	10-15 días

Fuente: Lagrange, 1979.

Hasta el momento, el rango psicrófilico ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del reactor necesario. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación.

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso, lo que implica, a la vez, un aumento en la eliminación de organismos patógenos. Sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga. Como regla general, la actividad biológica se duplica cada incremento en 10°C dentro del rango de temperatura óptima. Para un óptimo funcionamiento del digester, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 -1.2° C/día.

Una técnica interesante es la combinación de dos fases de digestión, una primera termofílica de elevada carga orgánica y una segunda mesofílica con menor carga. Con este sistema se aprovechan las ventajas del sistema termofílico, pero se reducen los problemas de inestabilidad.

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico-químicos del mismo. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciendo la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para gases tales como NH_3 , H_2 y H_2S , dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaeróbicos. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de solubilidad del C_2O provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en lodos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por NH_3 .

Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos aumentando así la velocidad del proceso. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar su solubilidad con la temperatura serán potencialmente más tóxicos, lo que puede explicar parcialmente la mayor inhibición de determinados compuestos orgánicos en el rango termofílico, como los ácidos grasos (AG) de cadena larga.

Además, la temperatura influye directamente en determinados equilibrios químicos, con gran influencia sobre el proceso anaerobio, como los del amonio-amoniaco libre o ácidos grasos volátiles (AGV) ionizados-no ionizados. En general, con la temperatura se favorecen las formas no ionizadas, que resultan más tóxicas para los microorganismos (NH_3 y AGV- no ionizados). Por último, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura lo que implica menores necesidades de agitación.

Tiempo de retención hidráulica (TRH) y velocidad de carga orgánica

Según Varnero y Arellano (1991), mencionan que con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de sustrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del digestor. La materia orgánica o sólidos

volátiles (SV) se refiere a la parte de la materia seca (MS) o sólidos totales (ST), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 550° C. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10% de la mezcla agua estiércol. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10% de la mezcla agua estiércol en la mayoría de los casos. Por eso, los residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados.

La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de MS o SV. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura.

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 THR varían con la temperatura media de cada región, con la variación diaria estacional

Cuadro No. 12. Tiempo de retención hidráulico de Estiércol de Ganado en distintas Regiones.

Tiempo de retención hidráulico	Características
30-40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central.
40-60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía
60-90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

Fuente: Varnero, 1991.

En un digestor que opera a régimen estacionario o “discontinuo”, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga.

En un sistema de carga diaria (régimen semicontinuo), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será para alimentar al digestor, ya que se tiene la siguiente relación:

$$\text{Volumen de carga diaria m}^3/\text{día} = \frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Tiempos de retención (días)}}$$

Existe otro parámetro para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el digestor, denominado Tiempo de Retención de los Sólidos Biológicos (TRSB), el que se determina como la relación entre la cantidad de MO o SV que entra el digestor y la cantidad de MO o SV que sale del sistema cada día. El TRSB es asumido para representar la media del tiempo de retención de los microorganismos en el digestor.

Estos parámetros son importantes para los digestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del TRSB y del THR a través de la retención de la biomasa. La medición del THR es más fácil y práctico que el TRSB al nivel de las granjas.

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 dirigir un determinado volumen de material.

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el THR, ya varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandaran mayores tiempos de retención para ser más eficientes.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandaran mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

En los sistemas de mezcla completa, el tiempo de retención hidráulico (TRH) coincide con el celular, por lo que el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada así como la producción de metano, aunque este último valor comenzará a disminuir una vez alcanzado el óptimo. El tiempo de retención usual en el rango mesofílico para lodos de depuradora está entre 15 y 20 días, aunque este valor depende mucho del tipo de reactor utilizado.

La velocidad de carga orgánica (VCO) es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor.

Rangos de pH y Alcalinidad

Según Varnero y Arellano (1991), citan 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. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal.

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 las 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.

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y H_2 . Al aumentar la presión parcial de H_2 , las bacterias que degradan el ácido propiónico serán severamente inhibidas, causando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular, particularmente ácidos propiónico y butírico, lo cual disminuirá la producción de ácido acético, generando una disminución del pH. Si la situación no se corrige, el proceso eventualmente fallará.

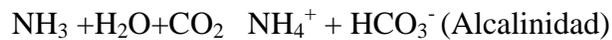
Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Este es el caso de los equilibrios ácido-base del amoníaco y del ácido acético. Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a valores de pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato.

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.

La carga orgánica volumétrica puede incrementarse gradualmente a medida que el proceso se recupera, hasta completar la capacidad de carga. En circunstancias extremas, además de la disminución de la carga orgánica volumétrica se puede suplementar algún químico para ajustar el pH. Otra opción recientemente explorada consiste en la dosificación periódica de oxígeno en el sistema anaeróbico. La oxigenación limitada contribuye a eliminar drásticamente el exceso de AGV a través de los microorganismos facultativos. Estos microorganismos son menos susceptibles a cambios en el pH. Debido a que los metanogénicos son vulnerables a cambios bruscos en el pH fuera del rango óptimo, el

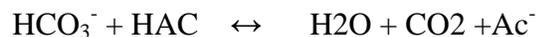
sistema anaeróbico requiere una capacidad buffer (alcalinidad) para mitigar los cambios en el pH.

El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema. La destrucción de la materia orgánica, principalmente las proteínas, liberan amoníaco. Cada mol de nitrógeno orgánico teóricamente genera un equivalente de alcalinidad. El amoníaco reacciona con el dióxido de carbono durante una reacción bioquímica para producir bicarbonato de amonio, el cual contribuye a la alcalinidad del sistema, tal como muestran las siguientes ecuaciones:



Sólo los residuos que presentan altos contenidos de nitrógeno orgánico (e.g. proteínas) pueden contribuir adecuadamente a la alcalinidad. Muchos residuos ricos en carbohidratos (e.g. melasa, papa, almidón) no contribuyen a la alcalinidad porque carecen de nitrógeno orgánico. Por lo tanto, la digestión de aquellos residuos orgánicos requiere la suplementación de alcalinidad.

Cuando los AGV comienzan a acumularse en el reactor anaeróbico, estos son neutralizados por la alcalinidad presente en el reactor y mantiene el pH estable tal como se muestra en la siguiente ecuación:



En muchos casos, para mantener el pH óptimo en el reactor, es necesaria la suplementación de alcalinidad utilizando químicos tales como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoníaco, cal, hidróxido de sodio y potasio. Se prefiere el bicarbonato de sodio debido a su alta solubilidad y baja toxicidad.

Es importante considerar que en forma frecuente, el pH se utiliza como un parámetro para evaluar la correcta operación del sistema. Sin embargo, debido a que el efluente entra en contacto con el ambiente, los cambios en la presión parcial de los gases ácidos disueltos, especialmente el CO₂, resulta en cambios del pH.

El nivel de pH deseado para la operación del digestor se puede conseguir ajustando el pH de las materias primas que entran al digestor o controlando el pH en el digestor. Para conseguir el pH deseado, se requiere conocer la cantidad de químicos necesarios que se deben adicionar a las materias primas que entrarán al digestor, en tanto que, en el último caso, tal conocimiento previo no se requiere. El reactor generalmente es monitoreado con un medidor de pH onlineconectado a un controlador. El pH deseado se programa y a la adición de químicos (ácido o base) se lleva a cabo de forma automática. Aunque este tipo de control automatizado del digestor es altamente deseable, es un sistema bastante costoso.

Ácidos grasos volátiles

Según Varnero y Arellano (1991), mencionan que la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. El término “volátil” indica la degradación anaeróbica, la materia orgánica compleja es hidrolizada y fermentada en compuestos de bajo peso molecular, incluyendo ácidos grasos de cadena corta (C2-C6). Estos incluyen principalmente ácidos acético, propiónico y butírico y en menores cantidades ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico.

En un sistema anaeróbico óptimo, la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra usualmente en el rango de 50-250 mg HAc/l. Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los AGV se acumulan. La inhibición de los metanogénicos debido a la toxicidad (sulfuro, amoníaco, metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, etc.) cambios en las condiciones ambientales (pH, temperatura, potencial redox) o limitación de nutrientes pueden gatillar una acumulación de acetato e hidrógeno. Una presión parcial de hidrógeno excesiva, inhibe severamente a las bacterias que degradan ácido propiónico, resultando en la acumulación de éste.

Al igual que el sulfuro y el amoníaco, las formas no ionizadas de AGV inhiben las bacterias metanogénicas cuando presentan concentraciones de 30-60 mg/L. Un aumento en

la concentración de ácidos volátiles en el sistema, implica una desestabilización del proceso y, en consecuencia una disminución de la producción de biogás.

Agitación- mezclado

Según Varnero y Arellano (1991), citan que los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cual el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicara una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás.

La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el THR, esto es básicamente por cuatro razones:

- Distribución uniforme de la temperatura y sustrato en el interior del biodigestor.
- Distribución uniforme de los productos, tanto intermedios como finales.
- Mayor contacto entre el sustrato y las bacterias, evitando la formación de cúmulos alrededor de las bacterias.
- Evitar la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, también llamada “nata” o “espuma” que dificulta la salida del biogás.

Se distinguen 3 tipos de agitación, estas son:

- Mecánica: a través de agitadores manuales o con motores eléctricos.
- Hidráulica: a través de bombas de flujo lento se hace recircular la biomasa.
- Burbujeo de biogás: se recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera el movimiento de la biomasa.

Productos obtenidos en la Fermentación Anaeróbica

De acuerdo a la FAO (2011), los principales productos del proceso de digestión anaeróbica, en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un bioabono que consiste en un efluente estabilizado.

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. El biogás tiene propiedades específicas que a continuación se indican:

Cuadro No. 13. Características generales 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 kmol ⁻¹

Fuente: Deublein y Steinhauser (2008)

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.

¿Qué es un biodigestor?

Según REESA (2013), un biodigestor es un sistema sencillo de conseguir; ya que su objetivo para elaborarlo es conseguir solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo de los residuos tanto humanos como animales. En su forma simple es un contenedor (llamado reactor) el cual está herméticamente cerrado y dentro del cual se deposita material, orgánico como estiércol y desechos vegetales (exceptuando los cítricos ya que estos acidifican). Los materiales orgánicos se ponen a fermentar con cierta cantidad de agua, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en fósforo, potasio y nitrógeno. Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de hidropresión y pos tratamiento a la salida del reactor. El proceso de biodigestión se da porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos en los estiércoles que al actuar en el material orgánico produce una mezcla de gases (con alto contenido de metano) al cual se le llama biogás. El biogás es un excelente combustible y el resultado de este proceso genera ciertos residuos con un alto grado de concentración de nutrientes el cual puede ser utilizado como fertilizante y puede utilizarse fresco, ya que por el tratamiento anaeróbico los malos olores son eliminados.

Los ovinos en el contexto mundial

Según reportes de la FAO (2004), en el mundo la producción de carne de ovinos, se desarrolla principalmente en la China, Australia, España, India, Nueva Zelanda, por nombrar solo a algunos países, dentro del ámbito mundial, México ocupa el lugar 37. Esta actividad se desarrolla en la gran mayoría de los países de todo el mundo, preponderadamente bajo sistemas de pastoreo.

De acuerdo a la SAGARPA (2000), en México se cuenta con 5'948,000 cabezas distribuyéndose el 35.2% en el estado de México, el 16.7% en Hidalgo, el 12.8% en San Luis Potosí, el 11.4% en Oaxaca y Puebla con el 5.7%.

Los ovinos en el contexto nacional

La producción ovina en México se localiza principalmente en el centro y sur del país generalmente se realiza bajo sistemas de pastoreo tradicionales, con escasa tecnología y con una productividad limitada.

La producción ovina tiene características regionales, el Norte del país, basa su producción en ovinos de lana así como de pelo especializados en producción de carne, se encuentran sistemas de pastoreo tecnificados ocupando por lo regular grandes extensiones.

La región del Centro, basa su producción en el ganado cruzado con Suffolk o Hampshire, así como razas de pelo, esta se efectúa de manera importante en zonas marginadas, en agostaderos de zonas áridas o semiáridas y en terrenos agrícolas, en donde se utilizan los residuos de las cosechas.

En la región Sur y Sur-Este con características tropicales, las razas empleadas son de pelo. En Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Veracruz, se explotan generalmente razas Pelibuey y Black Belly (panza negra) actualmente incorporando razas especializadas en carne como el Dorper, principalmente emplean en pastoreo extensivo.

De acuerdo con la AMCO (2007), en México la cría de ovinos ha formado parte de la cultura de los productores del campo. La industria ovina a lo largo de los años ha cambiado en función de la distribución de la tierra y de sus objetivos de producción. En el siglo pasado México exportaba lana, carne y piel cuando las condiciones de posesión de la tierra permitieron practicar una ovinocultura extensiva, trashumante y con grandes rebaños de borregos productores de lana. Al paso de los años y con la redistribución de la tierra a mediados del siglo pasado, la población ovina se redujo considerablemente cambiando también el tamaño de los rebaños. Sin embargo, en la última década, la producción de ovinos en el país tomó un nuevo impulso con la participación de las razas de pelo que se desarrollan en regiones sin tradición borreguera y con grandes rebaños.

En la misma cita se menciona que la población de ovinos en México durante los últimos diez años se ha mantenido alrededor de los 6 millones de cabezas; sin embargo, la producción ha crecido en los últimos cinco alrededor del 32 por ciento, siendo la actividad pecuaria que en los últimos ha tenido un mayor crecimiento en el país. Hoy día, la producción de ovinos está orientada principalmente a la producción de carne; alcanzando una producción para el 2006 de alrededor de 47 mil toneladas.

La UNO (2013), menciona que las principales razas explotadas en México son: Rambouillet, Dorset, Hampshire, Suffolk, Katahdin, Pelibuey, Black Belly, Saint Croix y Dorper. Otras, con poblaciones menores son la Romanov, Texel, Charollais, East Friesian, Il de France y Damara.

Estiércol en México

SAGARPA (2013), nos dice que los estiércoles se han estado usando en la agricultura, desde que el productor combino su actividad agrícola con la ganadera en el nivel de traspatio o solar. Bajo estas condiciones los estiércoles no presentan problema en su almacenamiento y manejo por volúmenes y la facilidad que se presenta para su transporte.

Cuando se manejan hatos o establos grandes es necesario seguir un procedimiento apropiado en el almacenamiento del estiércol para evitar la pérdida de nutrimentos principalmente de Nitrógeno (puede lavarse fácilmente con la lluvia o volatilizarse como amoníaco por calentamiento y evaporación del agua). Los grandes volúmenes de estiércol, si no se manejan apropiadamente por anaerobiosis producen metano y otros gases contaminantes y de mal olor. También proliferan organismos asociados a la transmisión de algunas enfermedades del hombre.

En la misma cita se menciona 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. El uso potencial de los estiércoles en diferentes regiones se puede estimar si se conoce el número de cabezas existentes y la cantidad de excretas que produce un animal diariamente con un contenido medio de humedad.

Pérez (2006), menciona que la mezcla de residuos sólidos y líquidos que con 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.

Cuadro No. 14. Producción anual de estiércol por especie animal en la República Mexicana.

Tipo de estiércol	Producción Kg/día	Producción miles de toneladas/año)	
		1970	1998
Gallinaza	0.017	1700	1203
Porqueriza	0.450	3300	1651
Caprino	0.700	1880	1531
Ovino	0.700	1000	993
Bovino	6.000	36600	50882
Equino	1.500	48800	48000
Total/año		49200	61060

Fuente: Población Animal Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, INEGI (1997); Cruz (1986).

Contenido nutrimental

De acuerdo con SAGARPA (2013), el contenido de nutrimentos en los estiércoles es muy variable depende de la especie que lo produce, edad del animal, su eficiencia digestiva, tipo de alimentación que recibe y el manejo a que ha sido sometido el estiércol desde su recolección, maduración y almacenamiento.

Taiganides, et all. (1996), Citado por Pérez (2006), cita que estudios estadísticamente significativos realizados sobre este tema en E.U, 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 del 90% de los sólidos se excreta en las heces y el 10% en la orina como minerales, potasio, fosforo y amoniaco-nitrógeno.

Cuadro No.15. Contenido total de nutrimentos en algunos Estiércoles en México.

Determinaciones	Tipo de Estiércol				
	Vacuno	Gallinaza	Porcino	Equino	Caprino
Humedad	36.0	30.0	20.0	25.0	18.0
pH(relación 1:2)	8.0	7.4	7.2	7.0	7.5
Materia orgánica (%)	70.0	70.0	68.0	60.0	55.0
Nitrógeno total (%)	1.5	3.7	3.7	1.2	2.5
Fosforo (%)	0.6	2.2	2.0	0.2	0.6
Potasio (%)	2.5	2.7	30.0	2.5	2.2
Calcio (%)	3.2	5.7	7.5	6.0	8.0
Magnesio (%)	0.8	1.0	2.3	0.2	0.2
Sodio (%)	1.6	1.1	0.3	0.1	0.1
Zinc (%)	130.6	516.0	-	-	-
Manganeso (ppm)	264.0	474.0	-	-	-
Hierro (ppm)	354.0	4902.0	-	-	-
Relación C/N	26.0	11.0	13.0	33.0	18.0
Mineralización (% 1er año)	35.0	90.0	65.0	30.0	32.0

Fuente: Romero (1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se muestran los materiales que fueron utilizados dentro de esta investigación así como la metodología empleada y se hace una breve descripción de las variables evaluadas.

Localización geográfica

La investigación fue desarrollada en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en la sección Agrotecnia, en Buenavista Saltillo, Coahuila durante el año 2012. Se encuentra localizado al sur de la ciudad de Saltillo, en el Km. 10 de la carretera a Zacatecas, entre los paralelos $25^{\circ} 22'$ y $25^{\circ}21'$ de latitud Norte y los meridianos $101^{\circ} 01'$ y $101^{\circ} 03'$ 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 anual de 490 mm, teniendo una humedad relativa media anual de 64.8 %, Suarez (2010).



Figura No. 5. Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la República Mexicana.

Materiales utilizados:

Para los fines que esta investigación persigue, se utilizaron los siguientes materiales:

Material biológico:

- Agua sin tratar.
- Estiércol de ovino, bovino lechero y de aves (gallinaza).

Material de laboratorio

1. Una cámara baño maría con calentadores eléctricos y un termómetro para medir la temperatura.



Figura No. 6. Cámara baño maría del Departamento de Agrotecnia de la UAAAN.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura No. 7. Termómetro de la cámara baño maría

Fuente: Elaboración Propia.

2. Bolsas de suero para la captación del biogás producido dentro del experimento, estas bolsas fueron conseguidas en el departamento de Agrotecnia; las cuales tiene una capacidad de almacenamiento de 1 litro.
3. Matraces Erlenmeyer de litro adaptados como biodigestores.
4. Tapones de goma para los matraces Erlenmeyer y tubos de vidrio.
5. Vasos precipitados de capacidad de 500 ml.
6. Un potenciómetro para la toma de pH marca Orión, el cual fue prestado por el Departamento de Agrotecnia donde fue realizado el trabajo debido a que ahí se encuentran las instalaciones y material necesario para la realización del experimento.



Figura No. 8. Potenciómetro utilizado para las muestras.

Fuente: Elaboración propia.

7. Medidor de Biogás en flujo Top-Trak^a Mass Flow Meters Sierra 820 series; utilizado para medir la cantidad de Biogás que se almaceno en las bolsas de suero; el cual fue facilitado por uno de mis asesores el Doctor Juan Carlos Zúñiga.



Figura No. 9. Medidor de Biogás en Flujo.

Fuente: Elaboración propia.

8. Balanza analítica con capacidad de 200 gr. Marca Orión utilizada para medir las muestra de estiércol.
9. Solución reguladora; la cual se utilizó para regular el potenciómetro y de este modo no afectar los resultados de las otras muestras.



Figura No. 10. Solución Reguladora

Fuente: elaboración propia.

Recolección de materia organica

Por otro lado los insumos relacionados con la producción del biogás fueron los siguientes:

Estiércol de ovino: Este material fue recolectado de manera aleatoria en la unidad metabólica de la Universidad donde de acuerdo a la información solicitada fue producido bajo condiciones de una dieta especial basada en granos molidos de sorgo y maíz, alfalfa deshidratada.

Estiércol de bovino lechero: para el caso de este material fue extraído del establo lechero de la Universidad, mismo que se eligió al azar, este material fue producido con una dieta rica en granos, alfalfa achicalada, avena, zacates, etc., los cuales son utilizados como alimento en este tipo de ganado.

Estiércol de gallina: el estiércol de gallina o gallinaza como comúnmente es conocido fue recolectado en una granja en el municipio de Jerez en el estado de Zacatecas, dado que se trata de una granja comercial la dieta que presentan las aves es rica en proteína (alimentos balanceados).



Figura No. 11. Estiércol de ovino (izquierda) y gallinaza (derecha)

Fuente: elaboración propia

Metodología

La técnica utilizada para la presente investigación es una cámara Baño María eléctrica y está basada en los siguientes pasos que son prácticos y de gran utilidad para la generación de Biogás a nivel laboratorio.

Una vez que se tiene los materiales y la instalación necesaria se procedió a realizar los siguientes pasos.

1. Se pesaron 100 gramos de material orgánico (estiércol) e introducir el estiércol dentro de los matraces Erlenmeyer, agregando 800 ml de agua sin tratar a cada matraz para dejar fermentar por 24 horas las muestras; se identificaron las muestras para llevar el registro de las mismas. Al mismo tiempo que se hace esto se colocó agua de la llave en la cámara de baño maría para mantener una temperatura de 30°C aproximadamente y hacer que permaneciera constante ya que se tiene la

información de que con esta temperatura las bacterias empiezan a trabajar en un ambiente de confort.

2. Una vez cumplido el tiempo de fermentación; se introdujeron los matraces Erlenmeyer dentro de la cámara de Baño María colocándolos de izquierda a derecha para poder tomar la lectura de los datos. Se colocó a cada matraz un tapón de goma y un tubo de vidrio junto con su respectiva bolsa de suero que es donde se acumularía el biogás producido.
3. Por último se limpiaba el equipo; para poder preparar las siguientes muestras y seguir con las etapas del experimento.

Etapas de la investigación

La investigación consto de tres etapas:

En la implementación de la **primera etapa**, que fue del día 27 de Junio al 04 de Julio del año 2012. En esta etapa el estiércol de ovino se presentó de una forma entero y de manera limpia, tal como es excretado (en bola).

La **segunda etapa**, se realizó del día 06 de Julio al 13 de Agosto del año 2012, donde la presentación del estiércol de ovino, se cribo para observar si registraba un cambio en la producción de biogás y determinar si la forma en la que se introduce el estiércol es un factor determinante en la producción de biogás.

Por ultimo en la **tercera etapa**, que se realizó del día 28 de Julio al 04 de Agosto del año 2012, se utilizó únicamente estiércol molido cribado de ovino en las tres presentaciones que fueron probadas en este trabajo limpio y entero (en bola), limpio y cribado y con diferentes porcentajes de paja, en las siguientes proporciones:

1er tratamiento: 100% estiércol

2do tratamiento: 70% estiércol y 30% paja

3er tratamiento: 60% estiércol y 40% paja

Cabe señalar que en las tres etapas se tuvo como testigo al estiércol de bovino que es el más estudiado y del cual se tienen mayores experimentos en este tema.

Descripción de los tratamientos

Este trabajo consistió en 3 etapas, las dos primeras etapas formadas de 3 tratamientos y 3 repeticiones; y la tercera etapa consto de 4 tratamientos y 3 repeticiones, los tratamientos que se utilizaron en las diferentes etapas se describen en los cuadros 16, 17 y 18:

Cuadro No. 16. Descripción de los tratamientos utilizados en la Etapa No. 1

Tratamiento	Material
1	Estiércol deshidratado, limpio y entero (en bola) de Ovino
2	Gallinaza deshidratada y cribada
3	Estiércol deshidratado y cribado de Bovino Lechero

El estiércol de bovino lechero y la gallinaza ya se tenían en el laboratorio; y el estiércol de ovino se consiguió al azar en la unidad metabólica de la Universidad; el cual fue limpiado; es decir, se le quito la paja.

Cuadro No. 17. Descripción de los tratamientos utilizados en la Etapa No. 2.

Tratamiento	Material
1	Estiércol deshidratado y cribado de Ovino
2	Gallinaza deshidratada y cribada
3	Estiércol deshidratado y criado de Bovino lechero.

En esta etapa el estiércol de ovino se cribo, para darle una variante al experimento.

Cuadro No. 18. Descripción de los tratamientos utilizados en la Etapa No. 3.

Tratamiento	Material
1	100% Estiércol deshidratado y cribado de Ovino
2	70% Estiércol deshidratado y cribado de Ovino, 30% de Paja
3	40% Estiércol deshidratado y cribado de Ovino, 60% de Paja
4	100% Estiércol deshidratado y cribado de un establo de Bovino Lechero

Fabricación de biodigestores

Se adaptaron matraces Erlenmeyer de un litro de capacidad como biodigestores. Estos se acondicionaron colocando un tapón de goma para evitar la pérdida de biogás, en el tapón se realizó una perforación para introducir una varilla de vidrio ya que por este se evaluaba el parámetro del pH.

Se colocaron los biodigestores dentro de la cámara de baño María con una mezcla de 100 gr/800 ml de agua sin tratar como ya se explicó anteriormente.



Figura No. 12. Biodigestores adaptados en la cámara a baño maría.

Fuente: Elaboración Propia.

Almacenamiento del gas

Se utilizaron bolsas de suero de un litro de capacidad que se conectaron con los biodigestores (matraces Erlenmeyer). Una vez que se llegaba la hora de observar la producción de biogás en las bolsas de suero, se procedía a medir el contenido de biogás con el medidor de biogás.



Figura No. 13. Bolsas de suero con el Volumen de Biogás.

Fuente: Elaboración Propia.

Variables evaluadas

Tal como lo describe la literatura citada, las principales variables utilizadas en la producción de biogás a partir de un proceso anaeróbico, es decir con ausencia de oxígeno, y que es el mismo que se utilizó en la presente investigación son la temperatura, pH de las muestras y el volumen de biogás entre las diferentes muestras de estiércol de diferentes especies animales.

Estas variables dentro del presente trabajo se mantuvieron constantes en las etapas realizadas dado; que el objeto de estudio es probar la reacción del estiércol de ovino para producir biogás presentando en distintas formas (entero, cribado y con un cierto porcentaje de paja) con las proporciones que en el apartado anterior se señalan bajo condiciones controladas.

- ✓ **Temperatura de la cámara de baño maría:** este factor se trató de mantener constante, ya que se contaba con datos de experimentos anteriores, el cual nos decía que la temperatura que se debe de tener es entre 30-37° C, la cual era la ideal para la producción de biogás, y por tal se realizaban lecturas diarias para tener el control sobre esta variable que es de suma importancia, para la producción de Biogás con fermentación anaeróbica.

- ✓ **pH de la materia orgánica (estiércol):** la medición de esta variable se realizó diariamente y a la misma hora durante un periodo de 7 a 10 días aproximadamente (días en los que dura cada etapa del experimento) con un potenciómetro de la marca Orión, el procedimiento para la medición de esta variable se realizó introduciendo el potenciómetro dentro de los biodigestores; procediendo a sacarlo y limpiarlo con agua destilada, agregando solución indicadora después para no alterar el dato de la siguiente muestra a medir.

Esta variable indicara en los resultados cual es el pH ideal o que rango debe de tener para obtener la mayor producción de biogás en los diferentes tipos de tratamientos que se utilizaron en este experimento, y con ello saber cuándo poder hacer una recarga a nuestros biodigestores. Y así obtener una mayor ganancia posible.

- ✓ **Volumen de biogás:** la medición del volumen se realizó con el medidor del biogás marca Top- Trak^a Mass Flow Meters Sierra 820 Series, el cual se acumulaba en las bolsas de suero; este parámetro se medía diariamente y a la misma hora para no tener alteraciones en los resultados, se desconectaba de bolsa de suero que almacenaba el biogás producido en el biodigestor que se media en litros estándar (SL); ya que se tenía el registro se volvía a conectar la bolsa de suero al biodigestor para el siguiente día.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica utilizada para el levantamiento de los datos consistió en monitorear a diario las variables utilizadas y el levantamiento diario de los datos. Una vez que los datos destacaban en el libro del registro de datos en el cual se asentaron los resultados diarios de la producción y se anotaron la observaciones que eran pertinentes para la investigación.

Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el análisis y procesamiento de los datos; el primer paso que realizo fue digitalizar los registros pasándolos a la computadora para su posterior procesamiento en el programa Excel. El análisis de los datos se hizo por separado para cada etapa con bloques al azar.

Cuantificar el biogás producido a partir de cada uno de los estiércoles no es tarea sencilla, por este motivo, se recurre a estimaciones de la producción de metano, a partir de estiércol, realizadas por diferentes investigadores.

Análisis estadístico

Montgomery (2003), cita que 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.

Diseño estadístico

El diseño experimental que fue utilizado es el de Bloques al Azar con tres tratamientos y tres repeticiones; para las dos primeras etapas y para la última etapa fue utilizada Bloques al Azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. El modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} = \mu + Z_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Efecto del i-esimo tratamiento en la j-esima repetición.

μ = Efecto de la media general

Z_i = Efecto de tratamiento

β_j = Efecto de bloques o repetición

ϵ_{ij} = Efecto de la media genera en tratamientos y repeticiones

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biogás obtenido en la primera etapa.

Los resultados encontrados en la producción de biogás total en la primera etapa de investigación, fueron de 0.25, 2.93 y 1.82 litros para los tratamientos, 1, 2 y 3 (testigo), respectivamente, encontrando que no hubo diferencia significativa ($P < 0.05$) para el efecto de los tratamiento y bloques (repeticiones) como se muestra en el cuadro 22.

En cuanto a la producción diaria de biogás (gráfica 1) fue de 0.01, 0.14 y 0.8 litros, para los tratamientos, 1, 2 y 3, respectivamente y se observó que esta inicio a las 24 horas de fermentación. En relación a la producción de biogás por gramo de materia orgánica por mililitros, se observó que esta fue de 0.08, 9.8, 0,61 mililitros para los tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente (cuadro 19).

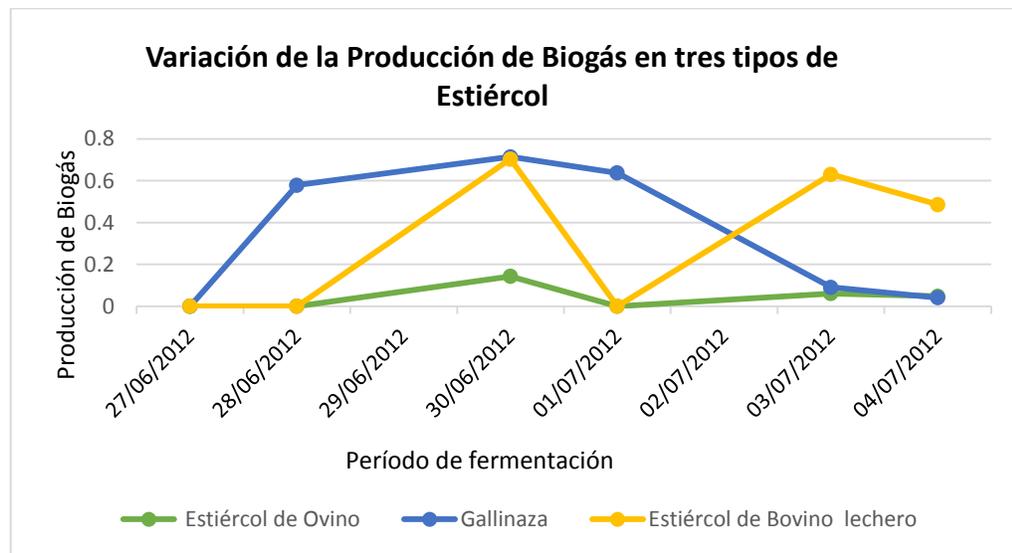
En relación a esto, el mejor tratamiento fue el dos (gallinaza deshidratada y cribada); porque con un solo gramo de materia orgánica se produjeron 9.8 mililitros de biogás.

Cuadro No. 19. Resumen de resultados para la Producción de Biogás en la Primera Etapa.

Número de tratamiento	Tratamiento	Biogás Producido (litros)	Biogás/100 gr de m.o (Litros)	Biogás Litros/día	Mml de Biogás /gramo de m.o.
1	Estiércol en bola y limpio de ovino	0.25 ^a	0.08	0.01	0.8
2	Gallinaza deshidratada	2.93 ^a	0.98	0.14	9.8
3	Estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero (t)	1.82 ^a	0.61	0.08	6.1

^a Literales iguales en columnas indican que no hay diferencia ($P < 0.05$)

m.o: materia orgánica.

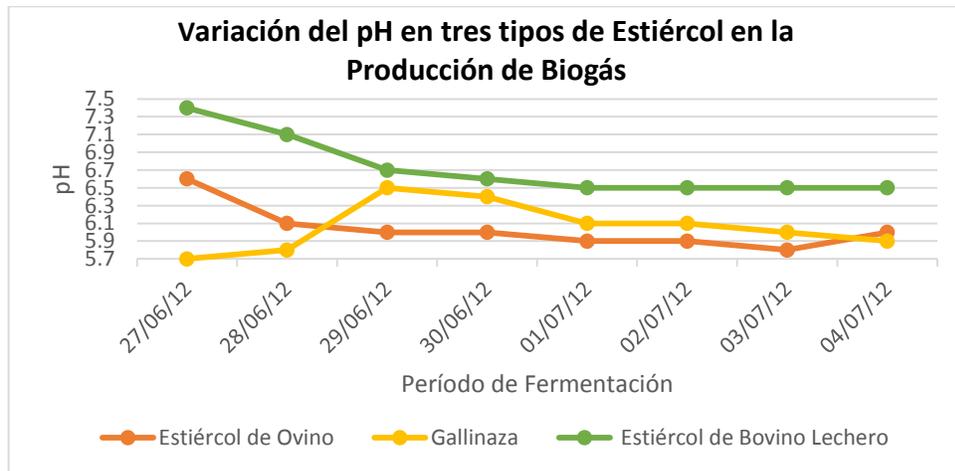


Gráfica No. 1. Evolución de tres tipos de estiércol para la producción de biogás. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Junio- Julio 2012.

Como se muestra en la gráfica 1, el tratamiento dos inició su proceso de producción al segundo día (24 horas) de iniciado el experimento, mientras que los tratamientos uno (estiércol en bola y limpio de ovino) y tres (estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero) lo hicieron al cuarto día, con una producción 0.14 y 0.08 litros. Las máximas producciones de los tres tratamientos se dieron al cuarto día.

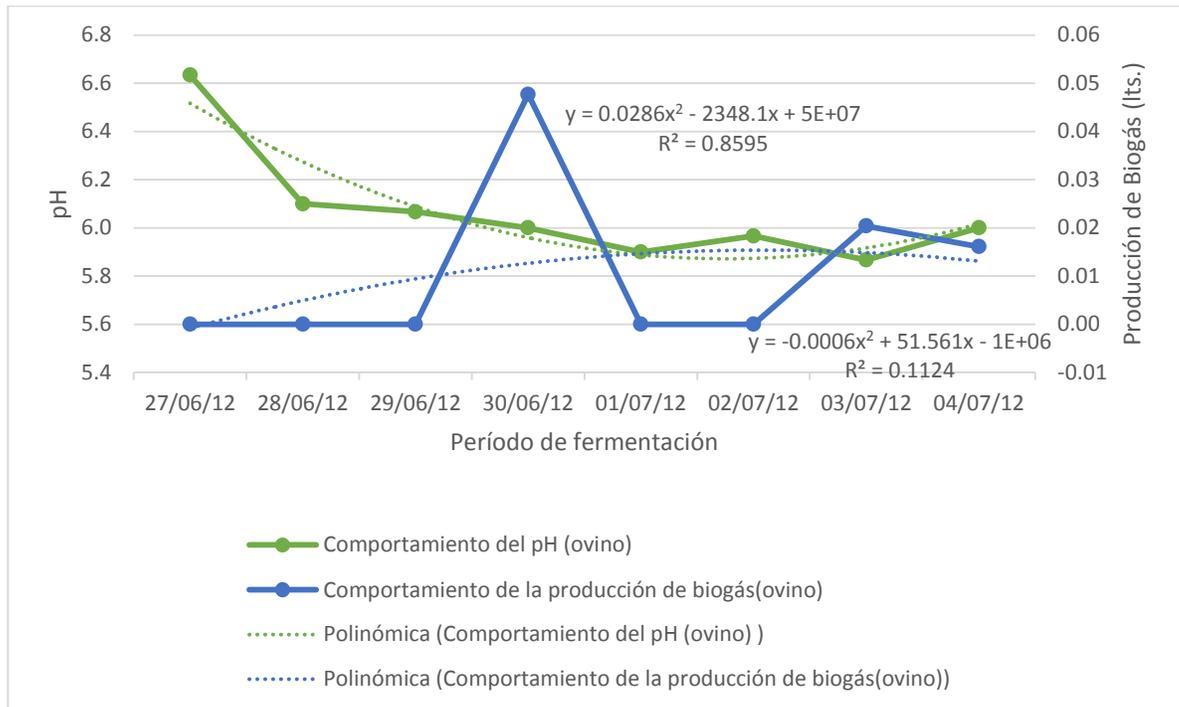
Efecto del pH en la producción de biogás

El comportamiento del pH se muestra en la gráfica 2, iniciando con pH de 6.6, 5.7 y 7.4 para los respectivos tratamientos en estudio. Es importante destacar esta diferencia en el pH, en valores iniciales de pH, pues este es un parámetro que influye mucho en el proceso bioquímico de la fermentación para generar biogás. Es muy probable que esta diferencia se deba al tipo de alimentación que recibieron las diferentes especies de ganado evaluadas a través de sus estiércoles, y, al proceso que recibió el alimento en el sistema digestivo de estas especies animales. El tratamiento uno (estiércol en bola y limpio de ovino), mantuvo en los siguientes seis días un valor de pH entre 5.8 y 6.1; el tratamiento dos (gallinaza deshidratada) entre 5.8 y 6.5 y el tratamiento tres (estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero) entre 6.5 y 7.1.

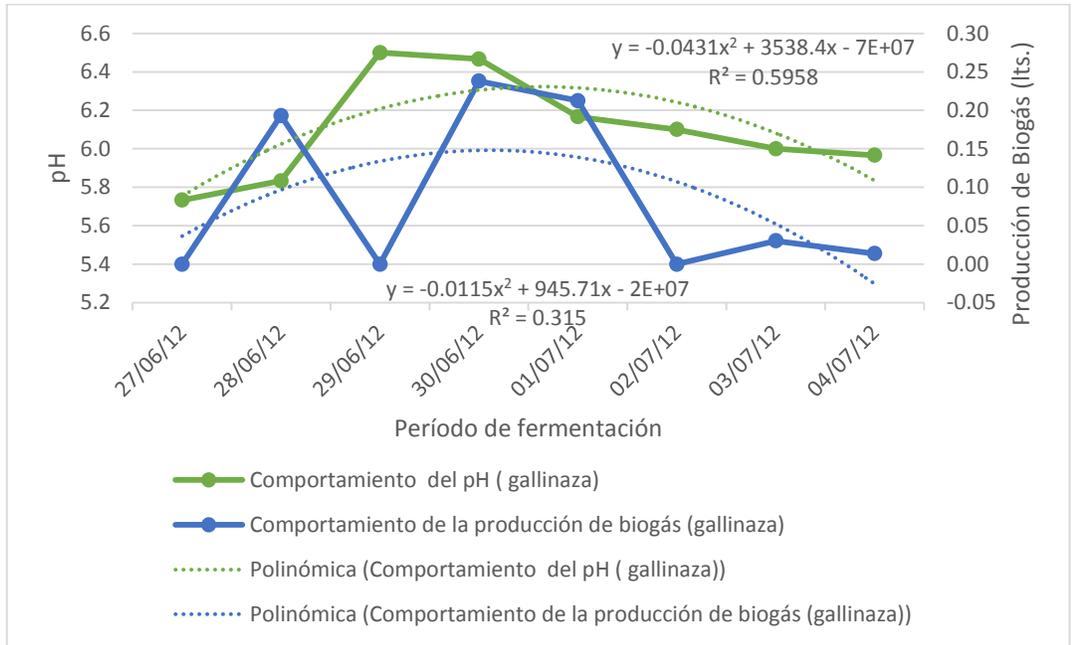


Gráfica No. 2. Evolución del pH en tres tratamientos en la producción de biogás. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Junio- Julio 2012.

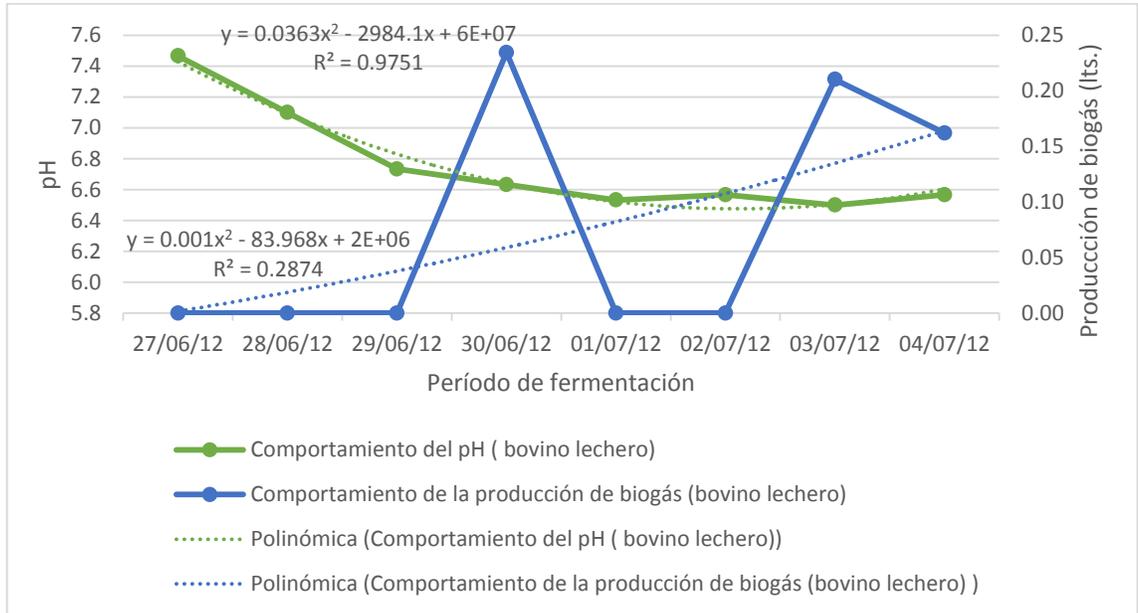
En las gráficas 3, 4 y 5 se aprecia de manera más clara, la relación que puede haber entre el potencial hidrogeno y el volumen de biogás.



Gráfica No. 3. Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol en bola y limpio de ovino. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Junio- Julio 2012.



Gráfica No. 4. Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de gallinaza deshidratada. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Junio- Julio 2012.



Gráfica No. 5. Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol deshidratado de bovino lechero. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Junio-Julio 2012.

Hilbert (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 tiempos de retención (TRH) varían con la temperatura media de cada región.

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

Biogás obtenido en la segunda etapa

La segunda etapa fue realizada con el propósito de evaluar el efecto en la producción de biogás al deshidratar y moler el estiércol de ovino que se presentó en bola y limpio en la etapa anterior. Asimismo esta nueva presentación se comparó con la gallinaza y nuestro testigo, el (estiércol de bovino lechero). Donde se dio un mejor resultado en la etapa anterior respecto al estiércol de ovino, que tuvo una mayor producción en esta etapa, respecto a la etapa anterior donde se presentó de una forma limpia y en bola.

El resumen de resultados en la producción de biogás total para la segunda etapa de la investigación (Cuadro 20), fueron 1.27, 5.70 y 1.97 litros para los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente, encontrando que hubo diferencia estadística al 0.05 de probabilidad entre los tratamientos; lo cual es similar a lo reportado por Santos (2014).

Como se muestra el mejor tratamiento con una producción promedio (100 gramos) de materia orgánica fue el tratamiento dos (gallinaza deshidratada) de 1.89 litros en un periodo de siete días, siguiendo el tratamiento tres (estiércol deshidratado de bovino lechero) que produjo 0.66 litro y por último el tratamiento uno (estiércol cribado y deshidratado de ovino) con 0.42 litro en el mismo periodo de tiempo.

Todo indica que la mejor producción de biogás es del tratamiento dos (gallinaza deshidratada), ya que está relacionado con su mayor contenido de elementos carbohidráticos y proteínicos.

Como se observa en lo citado por García (2014), las excretas aviares contienen un alto contenido nutritivo en comparación con el estiércol de bovino, ya que la base de las

dietas de las gallinas es el grano, y las aves solo aprovechan de un 15- 20 % del alimento que consumen y excretan el resto del alimento por lo tanto sus excretas son más ricas en nutrientes.

Cabe mencionar que en el caso de las aves, la orina, y las heces fecales salen al mismo tiempo, lo que incrementa en contenido de ácido úrico, rico en nitrógeno en su estiércol.

Cuadro No. 20. Resumen de resultados para la Producción de Biogás en la Segunda Etapa.

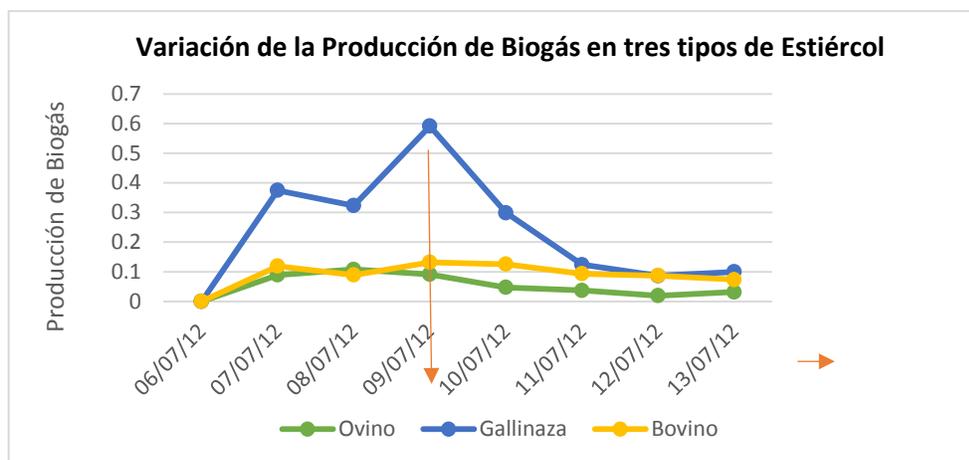
Número de tratamiento	Tratamiento	Biogás Producido (litros)	Biogás/100 gr de m.o (Litros)	Biogás Litros/día	Mml de Biogás /gramo de m.o.
1	Estiércol cribado y deshidratado de ovino	1.27 ^a	0.42	0.06	4.22
2	Gallinaza deshidratada	5.70 ^b	1.89	0.27	18.9
3	Estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero (t)	1.97 ^c	0.66	0.09	6.6

^{abc}: Indican diferencia estadística significativa al 0.05.

m.o.: materia orgánica.

En cuanto a la producción diaria de biogás (gráfica 6) fue de 0.06, 0.27 y 0.09 litros para los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente y se observó que este inicio a las 24 horas de fermentación, las máximas producciones de volumen de biogás se ven al tercer día de haber iniciado la fermentación. Destaca la gallinaza en cuanto al volumen de producción y la rapidez con que produjo teniendo una 0.42 litros, contra 0.13 litros de bovino y 0.09 litros de ovino. En relación al volumen de producción de biogás por un gramo de materia orgánica por mililitros; se observó que fue de 4.22, 18.90 y 6,60 mililitros respectivamente

para los tratamientos 1, 2 y 3. Con lo que se destacó que es mayor la producción de mililitros de biogás con un gramo de gallinaza en cuanto a las otras especies animales.



Gráfica No. 6. Evolución de tres tipos de Estiércol para la Producción de Biogás. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio 2012.

Lo anterior indica que el tiempo de retención en el proceso de fermentación anaeróbica para los tratamientos es de tres días, después de este tiempo debe de considerarse la idea de recargar el biodigestor con un porcentaje de materia orgánica para mantener ese volumen de producción de biogás, la cantidad de materia orgánica para recargar podría ser determinada en otro estudio, debido a que no se realizó en el presente, sin embargo con la experiencia del asesor se considera que se debe de hacer de un 10-20% del contenido del biodigestor. La recarga se hace extrayendo el porcentaje requerido de efluente del biodigestor y reponiéndolo con la misma cantidad 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 de estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fosforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores). Normalmente los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuada. En el caso de estiércoles animales, la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que reciban.

Es importante destacar que es de suma importancia que este estudio nos dio resultados positivos en cuanto a la producción de biogás con todas las materias orgánicas

que se fermentaron, ya que con ello el sector agrícola de nuestro país puede utilizar estos insumos animales y vegetales (biomasa) como lo menciona la SAPARPA (2012), para la generación de Bioenergéticos.

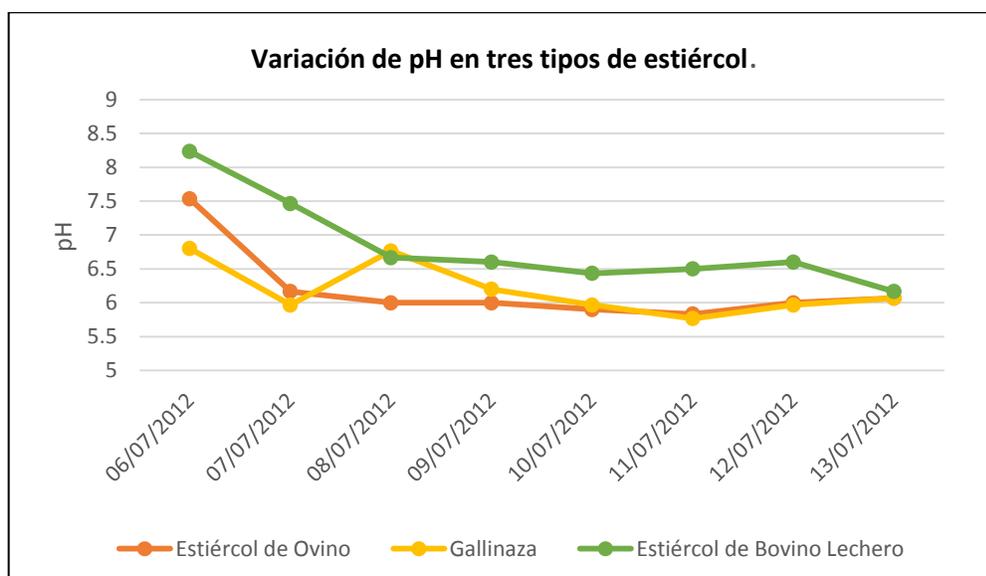
Efecto del pH en la Producción de Biogás

Como se muestra en la (gráfica 7), el comportamiento del pH es diferente. El estiércol de bovino presenta un pH inicial de 8.2 (alcalino), el estiércol de ovino 7.5 y la gallinaza presento un pH de 6.8 (ligeramente ácido) se considera que este factor inicial del pH está determinado por las diferencias en sus dietas de alimentación.

Como cita García 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 el de ovino y por último las excretas de bovino, debido a la dieta que cada una de ellas recibe.

En el proceso de fermentación anaeróbica al que se sometieron los estiércoles en estudio en un periodo de siete días, todos los tratamientos al final registran un pH ácido (gráfica 7), 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 6.0 el biogás producido es muy pobre en metano, como reporta McCarty (1964), citado por Rocchi, (2012), porque al bajar el pH se acumula los ácidos grasos volátiles (AGV) y se acumula dióxido de carbono y la producción de biogás desciende.



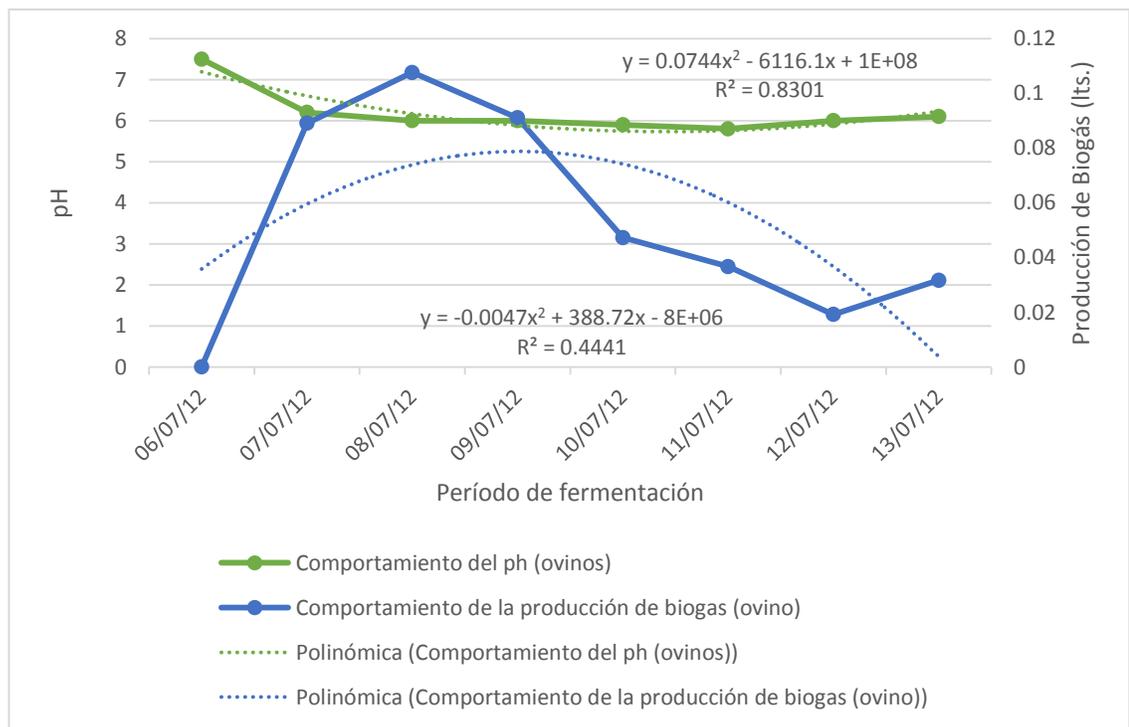
Gráfica. No. 7. Evolución del pH en tres tipos de Estiércol para la Producción de Biogás. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio 2012.

Las gráficas 8, 9 y 10 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, debido 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 de fermentación del estudio, por lo menos 15 días más, lo que concuerda con lo evaluado por Santos (2014).

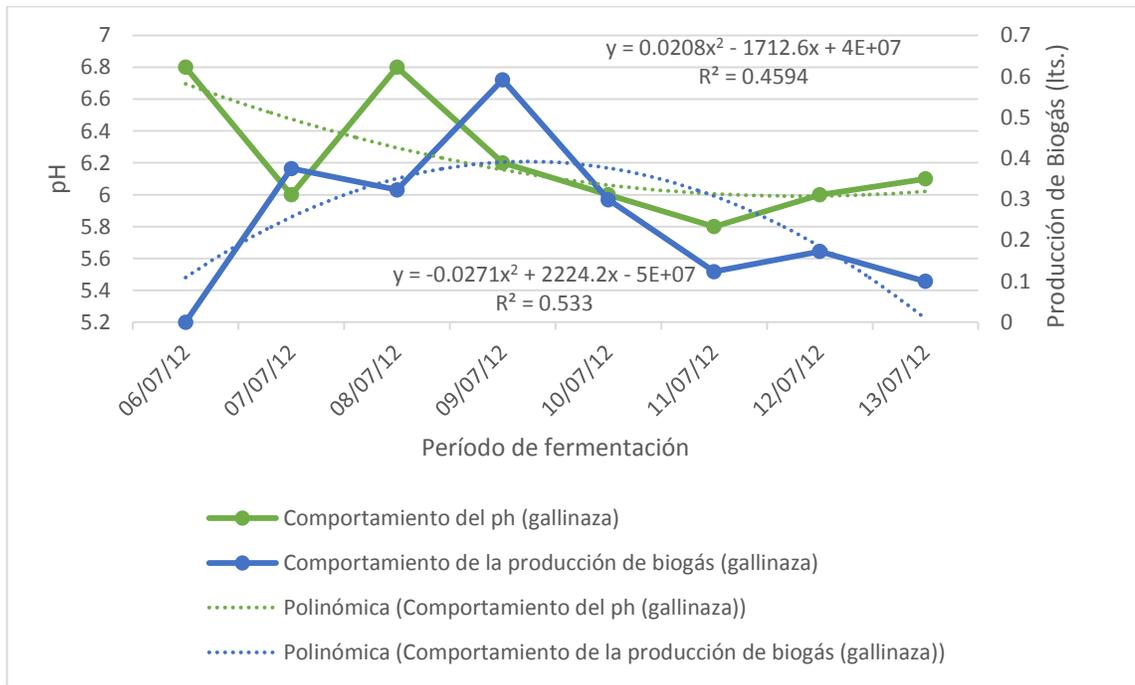
Los resultados anteriores no concuerdan con lo reportado por Suárez (2010), que cita a este aspecto, que la importancia del pH radica en que los organismos vivos, en este caso las bacterias, requieren un ambiente adecuado de pH para su desarrollo y actividad bioquímica. De este modo, muchas reacciones 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 Appropriate Exchange (2005), citado por Suárez (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 amoníaco 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.

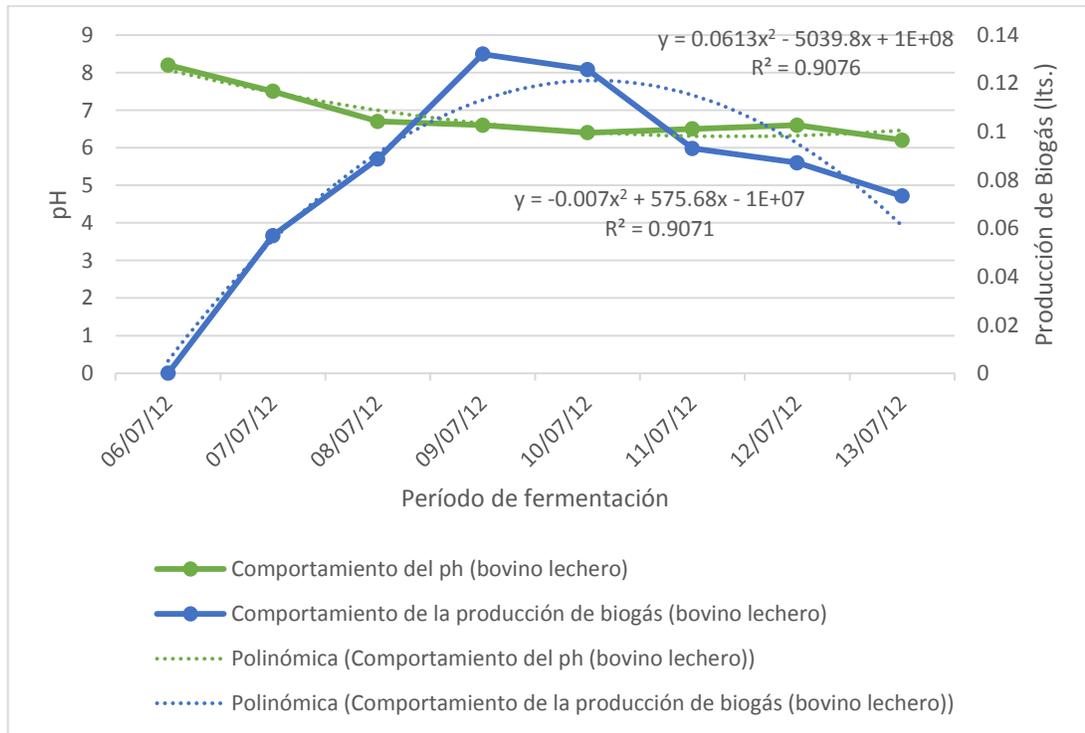
Lo encontrado en este trabajo respecto a la relación biogás-pH debe ser estudiado con mayor detalle con el propósito de conocer mejor los factores que inciden en esta asociación, lo que permitirá un mejor control de los mismos y por tal un mejor volumen de producción de biogás.



Gráfica No. 8. Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol deshidratado y cribado de ovino. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio 2012.



Gráfica No. 9. Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de gallinaza. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio 2012.



Gráfica No. 10. Asociación entre el pH y la producción de biogás a partir de estiércol deshidratado de bovino lechero. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio 2012.

Biogás obtenida en la tercera etapa

Esta etapa se evaluó de manera más amplia y concreta al estiércol de ovino; que fue el objeto de estudio de la investigación, tuvo la modificación de agregarle paja en diferentes porcentajes. Comparándolo con el tratamiento testigo (estiércol de bovino lechero).

Los resultados encontrados en el volumen de producción de biogás total (cuadro 21) en esta etapa fueron de 1.42, 2.99, 2.48, 1.12 litros para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 respectivamente, encontrando que no existe diferencia estadística entre tratamientos; y en lo que respecta a los bloques (repeticiones) tampoco se encontró diferencia alguna, donde se mostró que los mejores tratamientos son los que contienen un porcentaje de paja, teniendo los siguientes resultados: en volumen de producción promedio de biogás por cada 100 gramos de materia orgánica, el mejor resultado se obtuvo con el tratamiento dos (70 % estiércol cribado y deshidratado de ovino, 30% paja), con 0.99 litros; le siguió el tratamiento tres (40% estiércol cribado y deshidratado de ovino y 60% paja) con 0.83 litros, seguido por el tratamiento uno (100% estiércol cribado y deshidratado de ovino) con 0.47 litros. El volumen de biogás más bajo se obtuvo con el tratamiento testigo (100% estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero) con 0.41 litros.

Cuadro No. 21. Resumen de resultados de la producción de Biogás en la Tercera Etapa. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

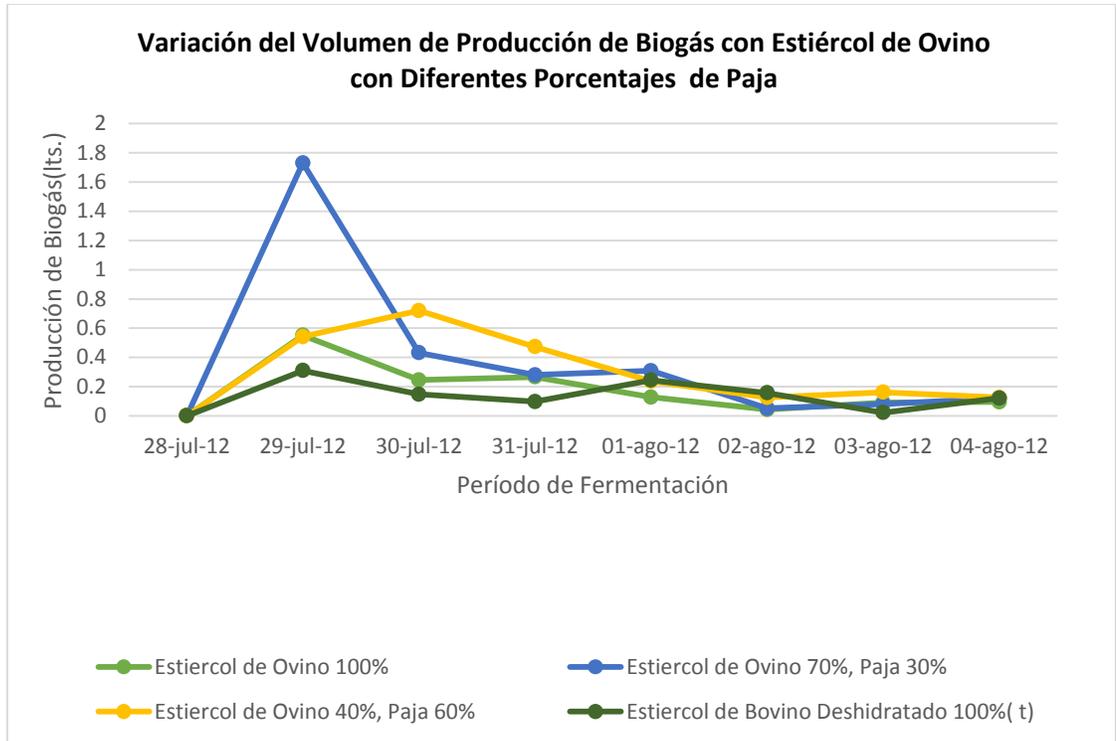
Número de tratamiento	Tratamiento	Biogás Producido (litros)	Biogás/100 gr de m.o (Litros)	Biogás Litros/día	Mml de Biogás /gramo de m.o.
1	100% Estiércol cribado y deshidratado de ovino	1.42 ^a	0.47	0.06	4.73
2	70 % Estiércol cribado y deshidratado de ovino. 30% Paja	2.99 ^a	0.99	0.14	9.98
3	40 % Estiércol cribado y deshidratado de ovino. 60 % Paja	2.49 ^a	0.82	0.12	8.27
4	100% Estiércol deshidratado y cribado de bovino lechero (t)	1.12 ^a	0.41	0.06	4.06

^a Literales iguales en columnas indican que no hay diferencia (P<0.05)

m.o.: materia orgánica.

En cuanto a la producción diaria de biogás como se puede observar en la gráfica 11, fue de 0.06, 0.14, 0.12 y 0.06 litros para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. También se observó que la producción inició a las 24 horas de establecido el experimento en todos los tratamientos, alcanzando el mayor volumen de producción y rapidez el tratamiento dos (70% estiércol deshidratado y cribado de ovino y 30% paja) con 1.73 litros y, también alcanza su mayor volumen pero en menor cantidad el tratamiento uno (100% estiércol deshidratado y cribado de ovino) con 0.43 litros, seguido por el tratamiento cuatro (estiércol de deshidratado y cribado de bovino lechero), el cual alcanzó su mayor volumen de producción en 24 horas con tan solo un volumen de 0.31 litros. Por último el tratamiento tres (40% estiércol de ovino y 60% paja) logró su mayor volumen de biogás al tercer día (36 horas) con 0.72 litros.

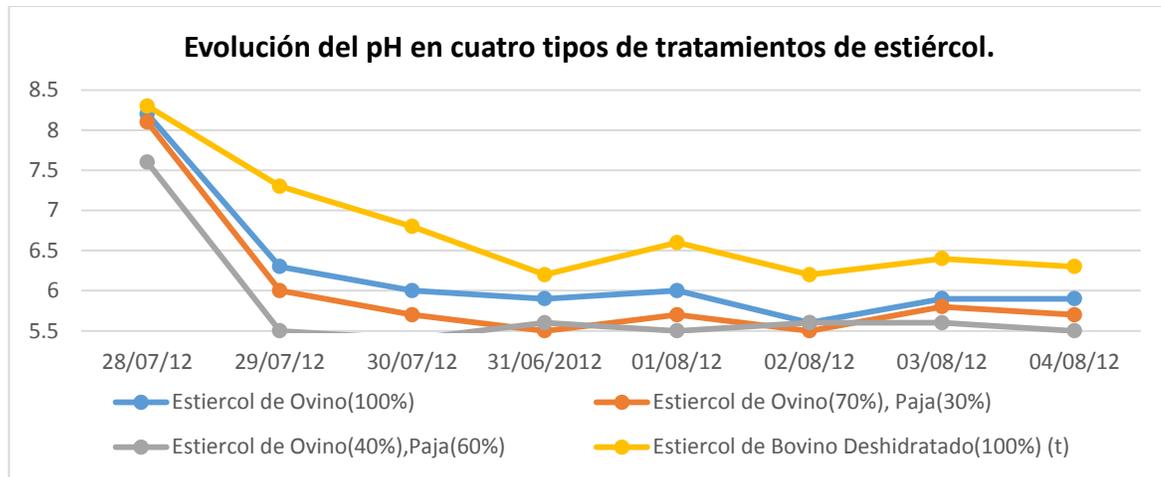
En relación a la producción de biogás por gramo de materia orgánica por mililitro, se observó que esta fue de 4.73, 9.98, 8,27 y 4.06 mililitros para los tratamientos 1, 2, 3 y 4 respectivamente (cuadro 21), lo que demuestra que el mejor tratamiento fue el número dos (70% estiércol deshidratado y cribado de ovino, 30% paja) ya que con tan solo un gramo de materia orgánica produjo 9.98 mililitros. Este tratamiento adhiere otra ventaja adicional a la producción de biogás, pues no se tuvo que invertir tiempo en limpiar el estiércol de paja, pues al parecer ésta permite lograr una mejor fermentación.



Gráfica No. 11. Evolución de cuatro materias materia orgánicas para la Producción de Biogás. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

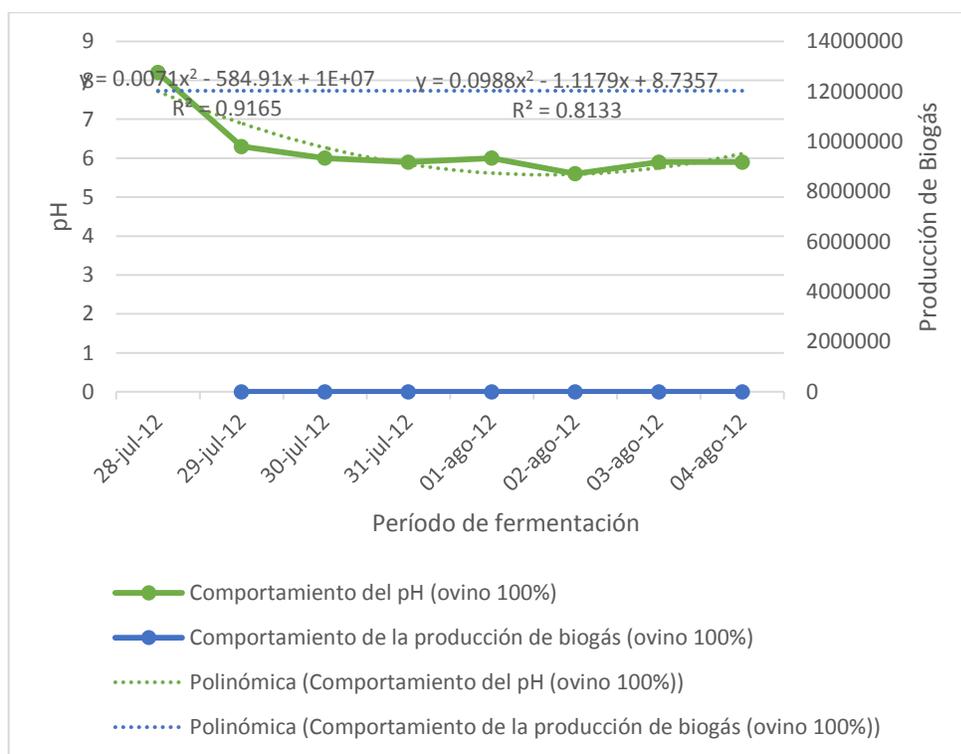
Efecto del pH en la Producción de Biogás

Como se muestra en la gráfica 12, el comportamiento del pH tuvo bastante similitud entre los tratamientos en estudio, porque iniciaron con un valor de pH semejante; 8.2, 8.1 y 8.3 para los tratamientos 1, 2, y 4, no así para el tratamiento tres que inició con un pH de 7.6, culminando al final de experimento con valores ligeramente ácidos de 5.9, 5.7, 5.5 y 6.3, durante el período de fermentación de 7 días.



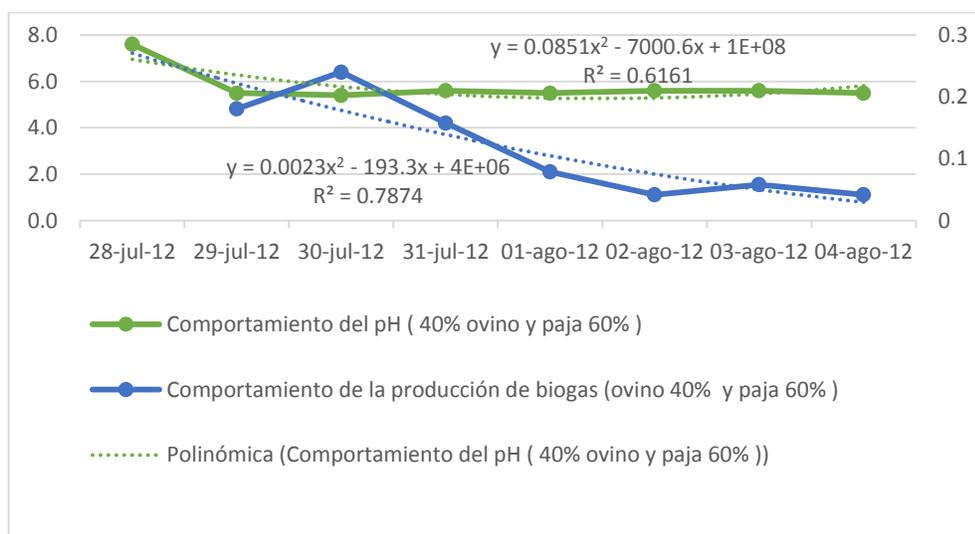
Gráfica No. 12. Evolución del pH de cuatro materias orgánicas para la Producción de Biogás. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

La gráfica 13 muestra que puede existir una asociación entre el volumen del biogás y el pH debido a que inicia con un pH de 8.2 (básico) y no hay una producción de biogás sino hasta el segundo día en que se registró una producción de 0.18 litros de biogás, con un pH de 6.3 siendo en este día donde se presentó el mayor volumen de biogás; debido a que la cantidad de biogás aumenta cuando se tiene un pH ácido, lo que indica que éste es un mejor “ambiente para la actividad fermentativa de los microorganismos metanogénicos. En los cinco días restantes, el pH se mantuvo entre 5.6 y 6.0; la producción de biogás decayó al sexto día, registrándose un pH de 5.8, indicando que los valores de pH debajo de 6.0 no son adecuados para la fermentación metanogénica.



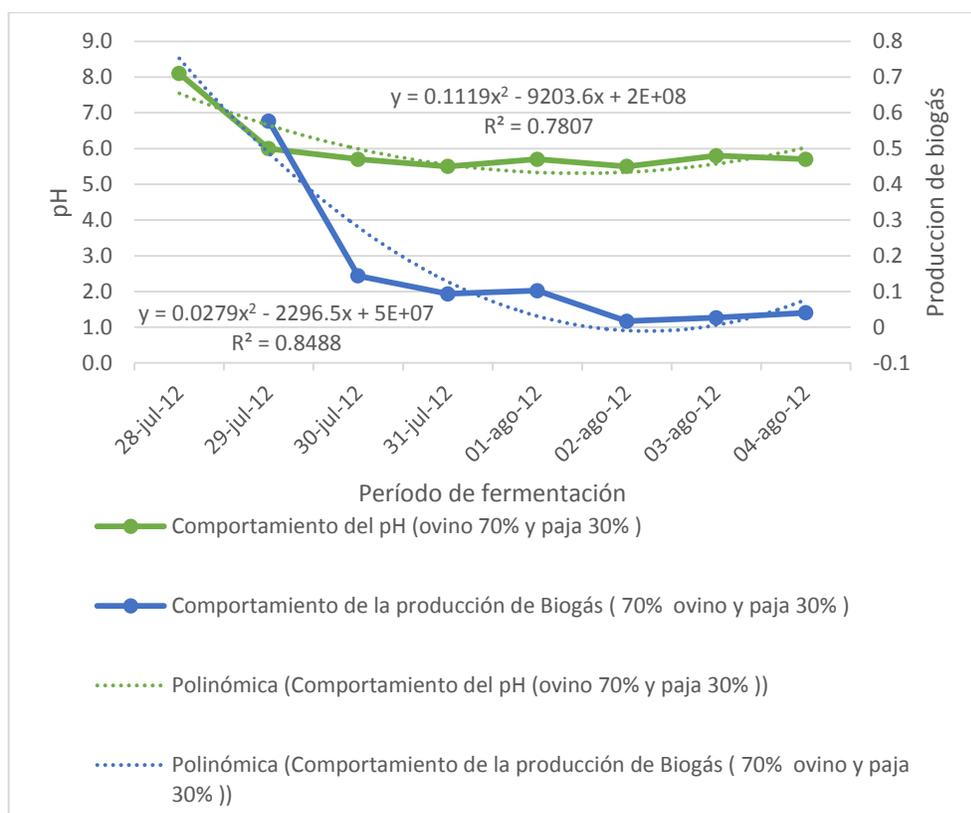
Gráfica No. 13. Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir de estiércol de ovino. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

En la gráfica 14 se muestra que el estiércol del ganado ovino inició con un pH de 8.1 pero no hay producción de biogás sino hasta el segundo día que se alcanza un pH de 6.0, siendo este día en que se dio la mayor producción de biogás de 0.58 litros. En los seis días restantes el pH se mantuvo entre 5.5 y 5.8. La producción de biogás decayó al sexto día, con 0.02 litros y un pH de 5.5. La relación del pH y la producción de biogás es que si el pH se mantiene en 6.0 se tendrá un nivel óptimo de volumen de la producción de biogás para este tipo de estiércol.



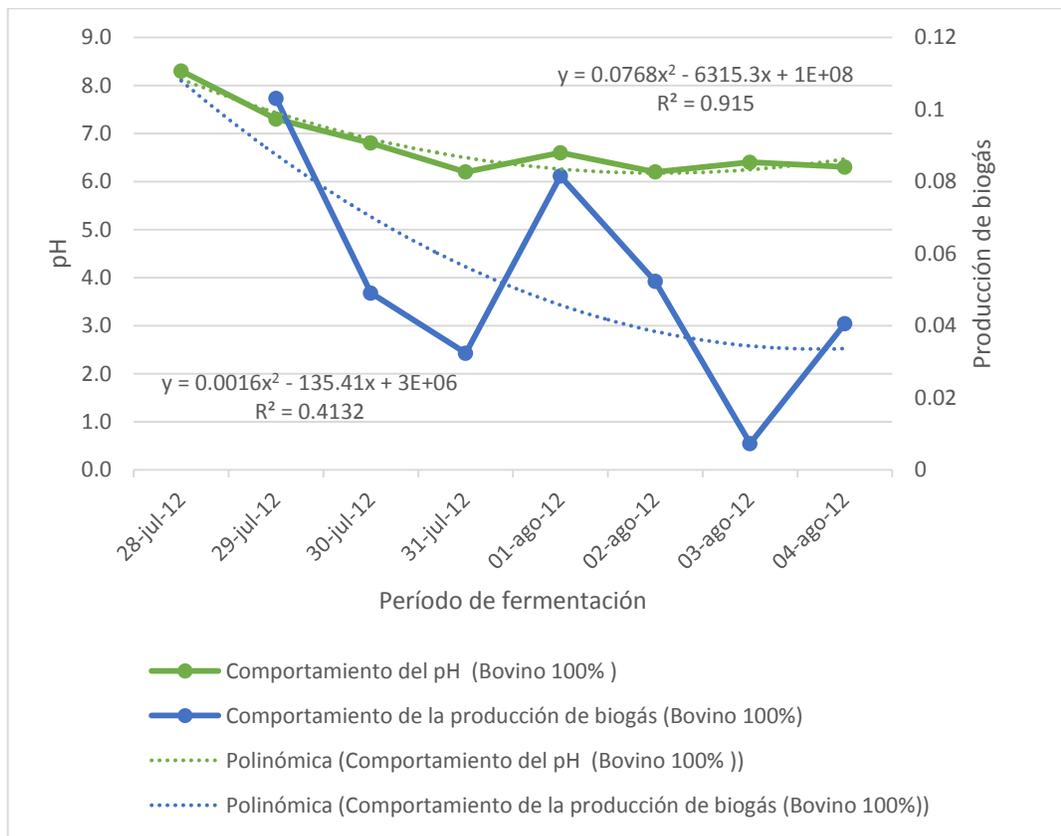
Gráfica No. 14. Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir de 40% de estiércol de ovino y 60% de paja. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

En la gráfica 15, se muestra que el estiércol de ovino mezclado con paja inició con un pH de 7.6 pero no hay producción de biogás sino hasta el tercer día (36 horas) de fermentación que hay un pH de 5.4 y se da el nivel óptimo de volumen de producción de biogás de 0.24 litros. En los seis días restantes el pH se mantiene entre 5.5-5.6 la producción de biogás decae al sexto día, con 0.04 litros y un pH de 5.6. La relación del pH y la producción de biogás es que si el pH se mantiene en 5.4 (ácido) se tendrá una alta producción de biogás para la condición citada de estiércol ovino.



Gráfica No. 15. Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir de 70 % de estiércol de ovino y 40% de paja. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

En la gráfica 16, se muestra que el estiércol de bovino lechero inició con un pH de 8.3 pero no hay producción de biogás sino hasta el segundo día (24 horas) de fermentación que hay un pH de 7.3 en el que se presentó la mayor producción de biogás de 0.10 litros. En los seis días restantes el pH se mantiene entre 6.2-6.8 la producción de biogás decae al séptimo día, con 0.007 litros y un pH de 6.4. La relación del pH y la producción de biogás es que si el pH se mantiene en 7.3 (ligeramente alcalino) se tendrá un mayor volumen de biogás. Cabe destacar que la fermentación anaerobia en este tipo de estiércol, registra su mejor comportamiento en ambientes con pH ligeramente alcalinos o ligeramente ácidos, a diferencia con lo registrado en el estiércol de ovino donde la mejor producción de biogás se registró con valores de pH ácidos (6.3).



Gráfica No. 16. Asociación del pH con la Producción de Biogás a partir estiércol de bovino lechero. UAAAN. Saltillo, Coah. México. Julio-Agosto 2012.

CONCLUSIONES

- 1) Se aceptó para todas las etapas del experimento la Ha1, porque es posible generar biogás a través de la fermentación anaeróbica con el estiércol de ovinos.
- 2) El acondicionamiento que se le dio al estiércol de ovino; (molido o entero) y con tiene influencia en el volumen de producción de biogás, por tanto se aceptó la Ha2, en esta investigación, ya que el tratamiento que tuvo mayor volumen de biogás producido, fue cuando se cambió la presentación de entero a molido, teniendo una producción de 0.25 litros cuando estaba en forma de bola el estiércol, contra 1.26 litros cuando se cribó.
- 3) La Ha3 se aceptó en la etapa 3; porque hubo un incremento del volumen de producción de biogás cuando se agregó un porcentaje de paja al estiércol de ovino; en este caso el más apropiado fue de un porcentaje de 30, con una producción de 2.99 litros, siguiendo el tratamiento que contenía 60 por ciento de paja con un volumen de 2.48 litros.
- 4) El acondicionamiento del pH influyo en el volumen del biogás; ya que existen diferencias notables en la producción de biogás, cuando el pH de los tratamientos utilizados tiene cambios.
- 5) Los residuos animales y vegetales (biomasa) son una excelente alternativa para la generación de nuevas energías, en este caso el biogás, porque tienen un equilibrio con el medio ambiente.

RECOMENDACIONES

- 1) Es de gran interés esta investigación; porque gracias a ella se puede recomendar ampliamente la utilización de estiércoles para la producción de biogás, en primer lugar la gallinaza, el estiércol de bovino lechero y al estiércol de ovino, sin olvidar que es mejor que vaya con un cierto porcentaje de paja.
- 2) Es importante aprovechar la alta generación de estiércol para el agro mexicano; y esta es una tecnología sustentable; porque a la mayoría de los ganaderos el estiércol solo les ocasiona problemas.
- 3) Hay que promover este tipo de energía sustentable; a través de proyectos.
- 4) Se puede utilizar este proceso solo que sería bueno incluir las recargas; para que siempre se tuviera el volumen óptimo de producción.
- 5) Buscar una alternativa para poder controlar el pH para un buen volumen de biogás.

LITERATURA CITADA

- Asociación Mexicana de Criadores de Ovinos (2007). Consultada en:
<http://www.uno.org.mx>. El 29 de mayo de 2013.
- Cheung, Keung (2012). “Energía a partir de desechos orgánicos”. Consultada en:
<http://www.dw.de/energ%C3%ADa-a-partir-de-desechos-org%C3%A1nicos/a-6150946>
. el 08 de Febrero 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 A. K. 2009. Codigestion Anaeróbica de Estiércol y Lodos de Depuradora para Producción de Biogás. Tesis de Maestría. Consultada en: El 16 de abril 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.aps>. El 16 de agosto de 2014.
- 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.gov.ar%2Fdocumentos%2Fmanualparalaproducciondebiogas%2Fat_muti_download%2Ffile%2FManual%2520para%2520la%2520la%2520produccio%25C3%25B3n%2520de%25C3%25A1s%2520del%2520IIR.pdf. El 04 de marzo de 2013.
- Lobera L. J. 2011. Historia del Biogás. Consultada en:
[http://www.metabioresor.eu/upmedios/image/Historia%20Biog%C3%A1s\(1\).pdf](http://www.metabioresor.eu/upmedios/image/Historia%20Biog%C3%A1s(1).pdf).
El 25 de febrero de 2013.
- Producción de biogás (2004). Consultada en:

http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/san_juan/712/producci%C3%B3n_de_biog%C3%A1s.htm. EL 15 de febrero de 2013.

REESA (2013). Consultada en <http://www.reesa.org.ar>. El 28 de febrero de 2013.

SAGARPA (2012). *Producción de Biogás a partir de Basura*. Consultada en: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biogas/produccion-de-biogas-a-partir-de-basura.html>

SAGARPA (2012). *Producción de Biogás a partir de estiércol*. Consultada en: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biogas/produccion-de-biogas-a-partir-de-estiercol.html>

SAGARPA (2012). *Producción de biodiesel: tipo de plantas productoras de biodiesel*. Consultada en: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biodiesel/tipos-de-plantas-productoras-de-biodiesel.html>

SAGARPA (2012). *Producción de bioetanol: fuentes de las que puede producirse*. Consultada en: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/fuentes-de-als-que-puede-producirse.html>

SAGARPA (2013). Utilización de Estiércol. Consultada en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilizaci%C3%B3n%20de%20esti%C3%A9rcoles.pdf>. El 15 de marzo de 2013.

Santos A. M. 2014. Generación de Biogás a partir de estiércol de ganado porcino de granja y casero comparado con otros estiércoles (bovino y ave). Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coahuila.

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

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 04 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 Febrero de 2013.

SAGARPA (2011). Consultada en:
<http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol/fuentes-de-als-que-puede-producirse.html>. El 20 de mayo de 2013.