

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
SEISESTIÉRCOLES Y SU POTENCIAL PARA
GENERAR ELECTRICIDAD Y BIOABONO**

PRESENTA:

CLARA LUCIA VERA BARRETO

TESIS PROFESIONAL

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN AGROECOLOGÍA

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE SEIS ESTIÉRCOLES Y SU POTENCIAL PARA
GENERAR ELECTRICIDAD Y BIOABONO

TESIS QUE PRESENTA:


CLARA LUCIA VERA BARRETO

ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y
APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN AGROECOLOGÍA

Aprobada por:

ASESOR PRINCIPAL:



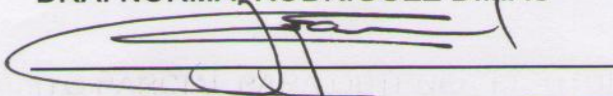
DR. JESÚS VÁSQUEZ ARROYO

ASESOR:



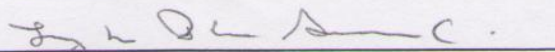
DRA. NORMA RODRÍGUEZ DIMAS

ASESOR:



DR. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ

ASESOR:



BIOL. LUZ MA. PATRICIA GUZMÁN CEDILLO



DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE SEIS ESTIÉRCOLES Y SU POTENCIAL PARA
GENERAR ELECTRICIDAD Y BIOABONO

TESIS QUE PRESENTA:

CLARA LUCIA VERA BARRETO

QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR Y
APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

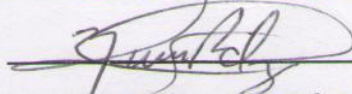
INGENIERO EN AGROECOLOGÍA

PRESIDENTE:



DR. JESÚS VÁSQUEZ ARROYO

VOCAL:



DRA. NORMA RODRÍGUEZ DIMAS

VOCAL:



DR. ALEJANDRO MORENO RESÉNDEZ

VOCAL SUPLENTE:



BIOL. LUZ MA. PATRICIA GUZMÁN CEDILLO



DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División de
Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

DICIEMBRE DE 2012

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a **Dios** por darme fuerzas y haberme permitido llegar hasta este momento con vida, salud y con un mi sueño realizado.

A mi **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por haberme permitido formar parte de ti, de poder prepararme en tus aulas y por haber sido mi segunda casa durante estos 4 años y medio, así como darme la oportunidad de culminar mi carrera.

Al **Dr. Jesús Vásquez Arroyo** por el privilegio que me dio de poder trabajar con una persona tan responsable y comprometida con su trabajo, por compartir conmigo sus conocimientos, le agradezco por guiarme en mi trabajo, por el tiempo que me presto, la paciencia y confianza que me tuvo y sobre todo por creer en mí. Ha sido un honor haber podido trabajar con una persona como usted. Así como a cada uno de mis asesores la **Biol. Luz Ma. Patricia Guzmán Cedillo** que tuve la oportunidad de haber tomado clases, además de ser una gran persona y amiga. A la **Dra. Norma Rodríguez Dimas** por permitirme ser su tesista y orientarme en mi trabajo, por esa paciencia que me tienes. Al **Dr. Alejandro Moreno Reséndez** por orientarme en mi trabajo y permitir que fuera su tesista. Para mi a sido un honor trabajar con ustedes.

A mis compañero de carrera

Rubisel Velázquez García, Abraham Castillejos Vázquez, Abraham González López Por brindarme su amistad en cada momento. Así por compartir conmigo experiencias inolvidables a lo largo de nuestra carrera.

A mis compañeros de casa

Adrián coyote Zúñiga, Andrey Castañeda coyote, Mauricio Sánchez Moran, Iván Rodríguez Vergara. Por haberme dado la oportunidad de convivir con ellos y poder ser como una familia, por ese apoyo que siempre me brindaron en cada momento.

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido vivir y alcanzar mi sueño, por haberme acompañado en momentos buenos y malos de mi vida. Y por darme una familia tan maravillosa.

A mis padres

Fausto Cirino Vera Pineda, Juana Barreto Liquidano

Por haber puesto su confianza en mí en todo momento, por su gran amor, cariño, educación, dedicación, entrega y haber creído en mi, gracias por ser unos padres excelentes, por inculcarme el respeto, la responsabilidad, honestidad y sobre todo humildad. Los quiero mucho.

A mi esposo y a mi hijo

Luis Alberto Flores Flores, Alan Lisandro Flores Vera

Por el gran amor y apoyo que me han dado, por estar a mi lado en las buenas y en las malas. Por cada sonrisita que me das que transforman mi vida, por ese te amo que tienes para mí, mi pequeño Alan. Los amo mis amores.

Amis abuelitos

Nicolás Barreto López, Carmen Liquidano Neri

Por estar conmigo en cada momento de mi vida, por su infinito cariño y amor, por esa fortaleza que los distingue y que me brindan, por esos consejos que jamás olvidare los quiero mucho abuelitos.

A mis hermanos

Juan, Marisol, Paola, Edith

Por ser los mejores hermanos, por compartir conmigo mis alegrías y mis éxitos.
Por ser como son los quiero mucho.

A mis sobrinos

Ángel, Julitzy, Alejandro, Guadalupe.

Por el amor que me brindan en cada sonrisa y palabra que tiene para mi, los amo mis pequeños campeones.

RESUMÉN

La ganadería es una de las actividades que han contaminado a la atmósfera por la emisión de grandes cantidades de metano (CH_4), un gas de efecto invernadero que absorbe 25 veces más calor que el bióxido de carbono (CO_2) contribuyendo al calentamiento global del planeta. Las excretas de animales domesticados (porcinos, equinos, bovinos, aves entre otros), son materia prima para generar biocombustibles (biogás y bioetanol, según el sustrato). El objetivo del trabajo fue determinar la producción de biogás en seis diferentes estiércoles bajo las condiciones de la Comarca Lagunera y así estimar su potencial para generar electricidad y bioabono. El presente trabajo se realizó bajo un diseño experimental factorial de A X B con tres repeticiones. Donde el factor A, representa seis diferentes estiércoles y el factor B, los tratamientos al estiércol en tiempos de ebullición ($T_1 = 0$ min, $T_2 = 30$ min y $T_3 = 45$ min). La variable estudiada fue la producción de biogás y electricidad por tonelada de sólidos totales. En la producción de biogás los resultados muestran como mejor tratamiento al estiércol de porcino con una producción media de 608 ml, mientras que, el estiércol de caprino resultó el mejor con ebullición de 30 y 45 minutos; generando 537 y 498 ml respectivamente. La menor producción se obtuvo en el estiércol de bovino, con 252 ml, así como con 45 min de ebullición (91 ml); mientras que con 30 minutos de ebullición lo fue, el estiércol de equino (112 ml). Considerando los sólidos totales, los mejores tratamientos fueron para el testigo del estiércol de equino ($303.8 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ ST}$), mientras que para ebullición a 30 y 45 minutos, lo fue el estiércol de caprino con 146.4 y $135.6 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1} \text{ ST}$ respectivamente. Estos tratamientos resultaron los de mayor potencial de producción de electricidad, con 325.2 , 156.6 y $145.2 \text{ KWh ton}^{-1} \text{ ST}$, respectivamente. Se concluye que es fundamental considerar el tipo de estiércol y la eficiencia en el uso de sus sólidos para la producción de biogás y energía, resultando en un excelente abono, tanto sólido como líquido, libre de organismos patógenos.

Palabras claves:Biodigestores, Digestión Anaerobia, Metano, Sólidos Totales

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	vi
RESUMÉN	viii
PALABRAS CLAVE	ix
ÍNDICE DE CONTENIDO	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	4
1.2. Objetivo específico	4
1.3. Hipótesis	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Biogás	5
2.1.1. Producción de biogás	5
2.1.2. Factores que influyen en la producción de biogás	6
2.1.2.1. Naturaleza del sustrato	6
2.1.2.2. Relación carbono/nitrógeno	7
2.1.2.3. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles	8
2.1.2.4. Potencial de hidrógeno (pH)	9
2.1.2.5. Temperatura	9
2.1.3. Proceso tecnológico para la producción de biogás	10
2.1.4. Utilización del biogás	11
2.1.5. Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad	11
2.2. Metano	12
2.2.1. Función de las bacterias metanógenas	13
2.2.2. Proceso bioquímico de producción de metano	14

2.2.3. Medición de metano	14
2.3. CO₂	15
2.4.1. El estiércol y su aplicación	16
2.4.2. Composición del estiércol	17
2.5. Bioabono sólido y líquido producido por digestión anaerobia	18
2.5.1. Calidad del bioabono	18
2.5.2. Usos del bioabono	19
2.6. El biodigestor	20
2.6.1. Tipos de biodigestor	21
2.7. Digestión anaerobia	22
2.7.1. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia	23
2.7. Potencial de metano para generar electricidad	24
III. MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1. Ubicación del experimento	26
3.2. Material biológico	26
3.3. Preparación de los biodigestores	26
3.4. Diseño experimental	27
3.5. Variables de estudio	27
3.5.1. Producción de biogás	27
3.5.2. Cálculos para estimar la producción de biogás a partir de estiércol (biogás/ ton de sólidos totales).	27
3.5.3. Cálculo para estimar la producción de energía eléctrica a partir de biogás generado de la fermentación de los estiércoles	28
3.5.4. Determinación de sólidos totales	28
3.5.5. Determinación de potencial hidrógeno (pH)	28
3.5.6. Determinación de conductividad eléctrica (C.E.)	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30

4.1. Producción de biogás por semana	30
4.1.1. Primer semana posterior a la inoculación	30
4.1.2. Segunda semana posterior a la inoculación	32
4.1.3. Tercera semana posterior a la inoculación	33
4.1.4. Cuarta semana posterior a la inoculación	35
4.2. Producción total de biogás	36
4.3. Producción total de biogás (m ton ⁻¹ sólidos totales)	43
4.4. Producción de electricidad KWh m⁻³ biogás	44
4.5. Determinación de Sólidos Totales	45
4.6. Determinación de potencial de hidrógeno (pH)	46
4.7. Determinación de Conductividad Eléctrica (C.E.)	47
V. CONCLUSIONES	50
VI. LITERATURA CITADA	51

I.INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental en la producción animal es de relevancia y abarca tanto a la salud humana como agua, suelo y calidad del aire. Existe preocupación, por el incremento de las concentraciones atmosféricas de gases tales como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), denominados genéricamente como gases de efecto invernadero (GEI), han llevado a la preocupación por el ambiente, y a la búsqueda de diversas alternativas para poder mejorarlo. Una de éstas, se da a través del uso de nuevos combustibles (Altieri y Nicholls, 2006). Los biocombustibles, considerados como una mezcla de hidrocarburos que se utilizan en los motores de combustión interna y que derivan de la biomasa y se utilizan como energías alternativas, entre los que se encuentran el biodiesel, bioetanol, biogás y biopropanol; son una alternativa ambiental, debido a una disminución de los GEI (Ruiz-Nuñez, 2012). Un cambio global será la seguridad en el suministro de energía, debido a que la mayoría de las energías convencionales de gas y petróleo, están concentradas en regiones políticamente inestables (Weiland, 2010).

La digestión anaeróbica es un proceso natural en el que los complejos materiales orgánicos son desintegrados a compuestos más simples en ausencia de oxígeno, por la acción de las comunidades de microorganismos pertenecientes al dominio Archae, que comprende al grupo de los metanógenos (Cioablaet *al.*, 2012; Trivediet *al.*, 2010). La digestión anaeróbica, consiste de cuatro pasos

bioquímicos: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Cioabla *et al.*, 2012).

La digestión anaeróbica de cultivos energéticos, residuos y desechos biodegradables, ha incrementado su interés a fin de reducir las emisiones GEI y facilitar un desarrollo sustentable en el suministro de energía. La demanda global de energía está creciendo rápidamente y cerca del 88 % de ésta, se produce de combustibles fósiles (Weiland, 2010).

La mezcla de estiércol con agua en el interior del biodigestor y con ausencia de aire, producirá biogás (Martí, 2008). 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 (Varnero, 2011).

Durante el año 2007 como producto de biogás, Europa generó 5.9 Mtep (Millones de toneladas equivalentes de petróleo), lo que significó un incremento del 20.5 % respecto a 2006, para el año 2011, se obtuvo un incremento del 171.2 % (10.1 Mtep) (Anónimo, 2012; Pascual *et al.*, 2011).

La actividad agropecuaria y el manejo adecuado de residuos rurales pueden contribuir significativamente a la producción y conversión de residuos animales y vegetales (biomasa) en distintas formas de energía. Durante la

digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, 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, para calentar o bien generar energía eléctrica. Tan solo en la Comarca Lagunera, la actividad pecuaria lechera, con un total aproximado de 400,000 cabezas de ganado, considerando un promedio de 8 kg de materia seca por animal, genera 3,200 toneladas diarias de estiércol bovino lechero (SAGARPA, 2012; Yue *et al.*, 2010).

Objetivo General:

Obtención de productos de valor agregado de la degradación de residuos lignocelulósicos agropecuarios de la Comarca Lagunera.

Objetivo específico.

Determinar la producción de biogás en seis diferentes estiércoles bajo las condiciones de la Comarca Lagunera y así estimar su potencial para generar electricidad y bioabono.

Hipótesis

Ho. La producción media de biogás utilizando diferentes estiércoles es igual.

Ha. La producción media de biogás utilizando diferentes estiércoles es diferente.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A partir del año 2006, Alemania se ha puesto a la cabeza de Europa en la producción de energía vía biogás, básicamente por la gran actividad en la implantación de pequeñas plantas descentralizadas de tratamiento de residuos agropecuarios con producción de energía eléctrica, en segunda posición se tiene a Gran Bretaña básicamente por la recuperación de biogás de vertederos. En tercera posición en la producción de energía eléctrica se encuentra Italia, la cual ha aumentado en un 10% de 2007 a 2008 (en torno a un 5% de incremento en términos de energía primaria) (Pascual *et al.*, 2011; Weiland 2010).

2.1. Biogás.

El biogás, es el producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica mediante el uso de organismos metanogénicos y esta compuesto principalmente de metano (50-70%), dióxido de carbono (20-40%), y otros gases como, monóxido de carbono, ácido sulfhídrico, hidrógeno entre otros (Ofoefule, 2011). Se denomina biogás agroindustrial, al biogás obtenido a partir de subproductos/residuos orgánicos de origen ganadero, agrícola y de la industria alimentaria (Pascual *et al.*, 2011).

2.1.1. Producción de biogás

La mezcla de estiércol con agua en el interior del biodigestor y con ausencia de aire, producirá biogás (Martí, 2008). 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 (Varnero, 2011). Tiene un valor calorífico de entre $25.9\text{y}30\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ dependiendo de la proporción de metano y otros gases constituyentes (Bagudo *et al.*, 2011).

2.1.2. Factores que influyen en la producción de biogás

La tasa de producción de biogás y su calidad depende ampliamente de diversos factores. Estos factores incluyen; La naturaleza de sustrato, temperatura, área de la superficie, La relación C: N, el contenido de Lignina, la agitación, entre otros (Bagudo *et al.*, 2011; Nagy y Szabó, 2011; Ofoefule, 2011; Weisset *et al.*, 2009; Varnero, 2011).

2.1.2.1. Naturaleza del sustrato

Las diversas materias primas que se pueden utilizar en la fermentación metanogénica, pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, agroindustrial, forestal, doméstico u otros. Las características bioquímicas complejas que presenten estos residuos deben permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema anaeróbico (Park *et al.*, 2011; Weiss *et al.*, 2009; Varnero, 2011).

En general, la concentración de sustancia solubles en agua, tales como azúcares, aminoácidos, proteínas y minerales, disminuyen con la edad en una

planta vegetal, empleada como sustrato, por lo que se considera que las plantas jóvenes, tendrán un mejor rendimiento de biogás, debido a la composición de elementos señalados (Bagudo *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2011).

Para los desechos de origen animal, el tipo y edad, su forma de alimentación y condiciones de vida, la edad y el almacenamiento del estiércol, son factores que alteran la cantidad y calidad del biogás producido (Bagudo *et al.*, 2011).

2.1.2.2. Relación carbono/ nitrógeno

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 20:1 hasta 30:1 (Varnero, 2011; Soria *et al.*, 2001).

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

biogás(Varnero, 2011). Sin embargo, esta relación es muy variable y dependiendo del sustrato, la relación C:N óptima, se deberá determinar y considerar, puesto que se ha utilizado sustratos de residuos de una planta de jabón, cafetería, cocina, pescado y grasas, siendo esta relación del orden de 18:1, 23:1, 11:1, 3:1 y 9:1, siendo en estos dos últimos, donde mayor producción de biogás se obtuvo (1.33 y 1.42 L g⁻¹SV) en condiciones mesofílicas y de 1.24 y 1.20 L g⁻¹SV en condiciones termofílicas (Chenet *al.*, 2010)

2.1.2.3. Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada sólidos totales(ST) (Cuadro 1). 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 efectúe satisfactoriamente (Chenet *al.*, 2010; Varnero, 2011).

Cuadro 1. Datos promedios sobre el contenido de sólidos totales de estiércol (Varnero, 2011).

Tipo de estiércol	Sólidos Totales %
Bovino	13.4 - 56.2
Porcino	15.0 - 49.0
Caprino	83.0 – 92.0
Ovino	32.0 - 45.0
Conejo	34.7 – 90.8
Equino	19.0 - 42.9

Contenidos ST de aproximadamente 1.5%, son apropiados para una buena planta de tratamiento de aguas residuales y se pueden incrementar hasta un 3-4% (Park et al., 2011), valores similares se han considerado para el caso de estiércol de bovinos (Yue et al., 2010).

2.1.2.4. Potencial de Hidrógeno (pH).

La dependencia de pH de las bacterias metanógenas, aporta un factor importante para la producción de metano. Ya que la producción de metano disminuye drásticamente a pH menores a 6.5 (Carmona, 2005). Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y H_2 (Varnero, 2011; Soria et al., 2001).

Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, inhibe el crecimiento microbiano y a valores de pH bajos se genera la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato. El pH 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. (Varnero, 2011; Cioabla et al., 2012).

2.1.2.5. 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(Cuadro 2). 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.Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C)(Varnero 2011; Soria *et al.*, 2001).

Cuadro 2. Intervalos de temperatura para a producción de biogás (Varnero 2011).

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo
Psycrophilica	4-10°C	15-18°C	20-25°C
Mesophica	15-20°C	25-35°C	35-45°C
Thermophica	25-45°C	50-60°C	75-80°C

2.1.3. Proceso tecnológico para la producción de biogás

Para la producción de biogás, varios tipos de procesos son aplicados los cuáles pueden ser clasificados por el proceso de fermentación húmedo o seco. En la digestión húmeda los procesos son manejados a concentraciones de sólidos totales en el fermentador por debajo de 10 % lo que permite una mezcla completa en el fermentador. El material asimilado es bombeable y puede ser esparcido en campos para la fertilización.Los procesos secos de digestión, son manejados con un contenido de sólidos totales entre el 15 y 35 % (Weiland, 2010).

2.1.4. Utilización del biogás

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos (Varnero,2011;Marchain,1992).

El biogás puede ser utilizado como combustible en quemadores para la calefacción de animales recién nacidos, para la iluminación mediante lámparas incandescentes , que no requieren el gas a presión; puede ser usado también como combustible único para refrigeradores, calentadores de agua y secadores de forrajes y granos (Botero y Preston, 1987).

2.1.5. Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad

Los sistemas combinados de calor y electricidad utilizan la electricidad generada por el combustible y el calor residual que se genera. Algunos sistemas combinados producen principalmente calor y la electricidad es secundaria. Otros sistemas producen principalmente electricidad y el calor residual se utiliza para calentar el agua del proceso. En ambos casos, se aumenta la eficiencia del proceso en contraste si se utilizara el biogás sólo para producir electricidad o calor (Varnero, 2011, Víquez, 2010).

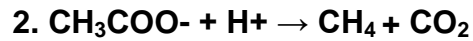
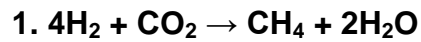
2.2. Metano

El metano puro tiene un poder calorífico aproximado de 9.100 kcal/m³ a 15.5 ° C y 1 atmósfera, el poder calorífico del biogás varía de 4.800 a 6.900 kcal/m³. En términos de equivalencia de energía, desde 1.33 hasta 1.87, y de 1.5 a 2.1 m³ de biogás equivale a un litro de gasolina y diesel, respectivamente. El biogás tiene una gravedad específica aproximada de 0.86 unidades (aire = 1) (Marchaim, 1992).

La formación de metano tiene lugar dentro de un intervalo del pH relativamente estrecho, de aproximadamente 6.5 a 8.5 con un intervalo óptimo de entre 7.0 y 8.0. El proceso está gravemente inhibido si el pH decrece debajo de 6.0 o se sobrepone a 8.5. El valor del pH aumenta por acumulación de amoníaco durante la degradación de proteínas, mientras la acumulación de ácidos grasos volátiles disminuye del valor del pH (Yue *et al.*, 2010).

Cerca de 500 millones de toneladas métricas/año ingresan a la atmósfera debido a las actividades antropogénicas y los fenómenos naturales. A esta tasa se espera que el metano cause cerca del 15-17% del calentamiento global. Hoy día las concentraciones de metano en la atmósfera son inferiores a las de CO₂, sin embargo el primero, se está incrementando rápidamente y además posee un efecto 21-30 veces más contaminante con respecto al CO₂, y por lo tanto, más potente que éste en aumentar el calentamiento global (Carmona, 2005).

La producción de metano en la naturaleza se realiza principalmente por dos vías (Carmona, 2005).



En el rumen la producción de metano se efectúa principalmente por la primera vía, debido a que esta requiere menos tiempo para la generación de las poblaciones (4-12 h). La segunda vía, denominada acetilclástica, no tiene tanto efecto debido a que los tiempos de generación para las poblaciones metanógenas deben ser mayores (Carmona, 2005; Weiland, 2010).

2.2.1. Función de las bacterias metanógenas

Las bacterias metanógenas incluyen: *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanobacterium formicicum*, *Methanomicrobium mobile*, éstas constituyen una clase especial en la población ruminal por su papel en la regulación de la fermentación total al eliminar H_2 . La reducción de CO_2 con H_2 es el método primario por el que se produce CH_4 en el rumen, sin embargo algunas bacterias metanógenas como *Methanosarcina barkerii*, utilizan metanol, metilamina y acetato para producir CH_4 . Al mantener baja la concentración de H_2 , mediante la formación de CH_4 , las bacterias metanógenas promueven el crecimiento de otras especies bacterianas y permiten una fermentación más eficaz (Carmona *et al.*, 2005; Trivedi *et al.*, 2010). Unas bacterias inicialmente producen una hidrólisis de estiércol generando ácidos orgánicos estos son digeridos a través de una

deshidrogenización y acetogénesis dando como resultado ácido acético o hidrogeno y finalmente las metanogénicas, dirigen el hidrogeno y el ácido acético para transformarlo en metano (Martí, 2008).

2.2.2. Proceso bioquímico de producción de metano

La fermentación de metano es un proceso complejo, que puede ser separado en cuatro fases: hidrólisis, ácidogenesis, acetogénesis/deshidrogenización, y metanización(Figura 1). Los pasos de degradación individuales son realizados por consorcios de diferentes microorganismos, que en parte están de pie en la interrelación sintrofica y colocan diferentes exigencias sobre el entorno (Angelidaki *et al.*,1993). La hidrolización y microorganismos fermentadores son responsables del ataque inicial sobre polímeros y monómeros y productos principalmente el acetato y el hidrógeno y las cantidades que varían de ácidos volátiles grasos como propionato y butirato (Weiland, 2010).

2.2.3. Medición de metano

El metano puede ser medido usando espectroscopia infrarroja, cromatografía de gas, espectroscopia de masa y técnicas de diodo láser. Las mediciones de metano son difíciles de realizar sin cámaras respiratorias; una alternativa es estimar el metano a través de cálculos. Esto usualmente se realiza por ecuaciones de regresión de consumo de energía digestible (ED), las cuales ignoran las relaciones de ácidos grasos volátiles y el balance de carbono. Esto

conllea a que los valores de energía metabolizable (EM) puedan no ser buenos estimativos de la producción de metano (Carmona, 2005).

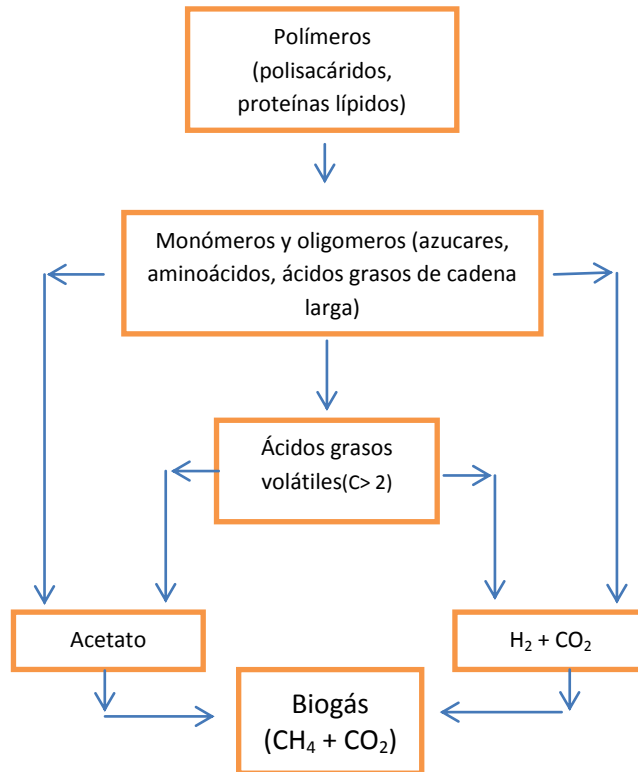


Figura 1. Estados del proceso de fermentación del metano (Weiland, 2010).

2.3 Bióxido de Carbono (CO₂)

El contenido de carbono en la atmósfera terrestre se ha incrementado desde los tiempos preindustriales a la fecha, principalmente en forma de dióxido de carbono (Zimoyet *al.*, 2006), el cual se considera, dentro de la gama de gases a los que se les atribuye efecto invernadero, como el más importante y el que actualmente tiene un mayor aporte al incremento del calentamiento

global(Carmona *et al.*, 2005; Verburg y Denier Van Der Gon, 2001). Esto se debe a las emisiones de este gas que contribuye a la contaminación del aire (West y Fiore, 2005).

El bióxido de carbono emitido al quemar el biogás proviene del carbono en los desechos orgánicos, el cual finalmente viene de la atmósfera y parte de un ciclo cerrado del carbono, por lo tanto no contribuye al incremento de los niveles de CO₂ atmosférico (Wilkie, 2005). Esto es de suma importancia en la agroecología, la cual por un lado representa el estudio de los procesos ecológicos en los agroecosistemas y por otro lado actúa como un agente de cambio que busca la transformación social y ecológica que debe ocurrir para lograr el desarrollo sostenible (Glissman, 2002).

2.4. El estiércol y sus aplicaciones

La mayor parte del estiércol se aplica al suelo agrícola dentro de los planes de fertilización, no obstante el exceso de estiércol que se produce en ciertas zonas con alta densidad ganadera pero baja superficie agrícola útil, hace disponer de nuevas alternativas para su reciclaje (Moreno y Moral, 2007).

El estiércol fresco es la materia prima para la producción de biogás. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cáscara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras). El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de cerdo y el humano,

pero el fertilizante que producen es muy ácido. El estiércol más equilibrado es el del ganado bovino, además que por animal se produce gran cantidad de estiércol, y por tanto es el más fácil de recoger(Cuadro 3).Otra característica de importancia del estiércol fresco es que contiene bacterias que continúan digiriéndolo y producen metano, dióxido de carbono y otros gases (Martí, 2008).

Cuadro 3. Producción diaria de estiércol (Martí, 2008).

Ganado	Kg Estiércol / 100 kg de peso del animal
Cerdo	4
Equino	7
Conejo	3
Bovino	7
Caprino	4
Ovino	4

2.4.1. Composición del estiércol

El estiércol no tiene una concentración fija de sus componentes. Esto depende de la especie animal, su edad, su alimentación y los residuos vegetales que se utilizan, entre otros. Mientras los animales jóvenes consumen una gran cantidad de insumos para su crecimiento y producen excrementos pobres, los animales adultos solamente substituyen las pérdidas y producen estiércoles ricos en elementos nutritivos. Además, mientras más rica la alimentación, mejor sale la composición del abono (Brecht, 2004).

2.5. Bioabono sólido y líquido producido por digestión anaerobia

La carga de mezcla diaria de estiércol con agua que se introduce al biodigestor será digerida por las bacterias y se producirá biogás. Pero por otro lado quedará un líquido ya digerido, que se convierte en un excelente fertilizante. Y éstos se diferencian entre su parte líquida y su parte sólida, llamando a la primera biól y a la segunda biosol (Martí, 2008). Las características del bioabono, dependen en gran medida del tipo de tecnología y de las materias primas utilizadas para la digestión (Varnero, 2011).

Cuadro 4. Relación C/N para diferentes estiércoles (Varnero, 2011).

Estiércol	C %	N %	C/N
Bovinos	30	1.3	25
Equinos	4	0.8	50
Ovinos	35	1.0	35
Porcinos	26	1.5	16
Caprinos	40	1.0	40
Conejos	35	1.5	23

2.5.1. Calidad del bioabono

La composición del bioabono en promedio tiene 8.5% de materia orgánica, 2.6 de nitrógeno 1.5% de fósforo, 1.0 % de potasio y un pH de 7.5 Este no posee mal olor, tampoco atrae moscas, no deja residuos tóxicos en el suelo, y eleva la calidad del mismo (Soria *et al.*, 2001; Martí, 2008).

2.5.2. Usos del bioabono

El bioabono es una fuente orgánica de fitorreguladores de crecimiento como el ácido indol acético (auxinas) y giberelinas que promueven actividades fisiológicas y estimulan el desarrollo de las plantas. Se puede utilizar en una gran variedad de plantas, ya sean de ciclo corto, anuales, bianuales o perennes; gramíneas, forrajeras, leguminosas, frutales, hortalizas, raíces, tubérculos y ornamentales, con aplicaciones dirigidas al follaje, al suelo, a la semilla o a la raíz (Soria *et al.*, 2001; Gomero, 2005).

El bioabono favorece al enraizamiento (aumenta y fortalece la base radicular), actúa sobre el follaje (amplía la base foliar), mejora la floración y activa el vigor y poder germinativo de las semillas, traducándose todo esto en un aumento significativo de las cosechas. Debe utilizarse diluido en agua, en proporciones que pueden variar desde un 25 a 75 %. Las aplicaciones deben realizarse de tres a cinco veces durante el desarrollo vegetativo de la planta (Soria *et al.*, 2001; Martí, 2008).

También se puede aplicar junto con el agua de riego para permitir una mejor distribución de las hormonas y los precursores hormonales que contiene. Con ello se mejora el desarrollo radicular de las plantas, así como la actividad de los microorganismos del suelo (Gomero, 2005).

Cuando es terreno se ara, se puede usar el fertilizante recién salido del biodigestor para regar cada surco. El día antes de sembrar, se pueden introducir las semillas o grano en una mezcla de 1 a 1 de fertilizante con agua por un tiempo de 4 o 5 horas. Una vez en crecimiento la planta se puede filtrar el fertilizante y fumigar (uso como fertilizante foliar) las plantas con una mezcla de 1 parte de fertilizante y 4 de agua. Funciona muy bien fumigar tras una helada, así como cuando ya comienza el fruto a aparecer, pero nunca durante la floración, ya que podría llegar a quemar la planta (Martí, 2008).

El uso del bioabono en programas de recuperación de suelos degradados permite mejorar el intercambio catiónico del suelo. Con ello se amplía la disponibilidad de nutrientes del suelo. También contribuye a aumentar la humedad del suelo y a la creación de un microclima adecuado para las plantas (Varnero, 2011).

2.6. El Biodigestor

Un biodigestor básicamente consiste en un depósito cerrado, donde se introducen los residuos orgánicos mezclados con agua para ser digeridos por microorganismos (Lagrange, 1979). El biogás producido por la fermentación se puede almacenar en este mismo depósito en la parte superior del digestor, llamada domo o campana de gas. Esta campana de almacenamiento puede ser rígida o flotante (Martí, 2008; Varnero, 2011).

2.6.1 Tipos de biodigestores

Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización. Los más sencillos caen dentro de la clasificación de digestores discontinuos o de cargas por lotes y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación. Resulta conveniente clasificarlos según su modo de operación con relación a su alimentación o carga en los siguientes tipos (Varnero, 2011; Gomero, 2005).

a) Continuos: Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales (Martí, 2008; Gomero, 2005; Varnero, 2011).

b) Semi continuos: Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este

proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digester Indiano y Chino (Martí, 2008; Gomero, 2005; Varnero, 2011).

c) Discontinuos o régimen estacionario: Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada (Varnero, 2011; Martí, 2008).

2.7. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás. Donde más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico (Varnero, 2011).

La digestión anaerobia de excremento de animal está clasificada tradicionalmente como un tratamiento para reducir los impactos ambientales de olor, agentes patógenos, y los excesos de nutrientes asociados con el excremento animal. La producción de biogás a través de esta ofrece ventajas significativas

sobre otras formas de producción de bioenergías. Esto ha sido evaluado como una de la tecnología más eficiente en la energía y ambientalmente beneficiosa para la producción de bioenergía (Yue *et al.*, 2010).

2.7.1. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia

Los sistemas de digestión anaerobia son un método atractivo para la producción de energía renovable, reducir olores, hacer uso eficiente en el reciclado de los desechos orgánicos, mejorar el uso del estiércol como fertilizante y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Umetsue *et al.*, 2005). Además, constituyen una tecnología sustentable para la producción de energía (Wilkie, 2005), lo cual podría traducirse en la creación de una nueva economía local y empleos (Ritchie y Watts, 2005).

Se ha demostrado que la digestión anaerobia es un proceso confiable cuando se lleva a cabo en condiciones termofílicas porque aumenta la hidrólisis, incrementa la descomposición de sólidos orgánicos y ofrece un control eficiente de patógenos y parásitos (Tinajero y Noyola, 2006).

La baja eliminación de sólidos volátiles y la acumulación de ácidos grasos volátiles, principalmente ácido propiónico, disminuyen la capacidad de amortiguamiento del sistema con riesgo de reducir el pH y lograr una baja conversión de materia orgánica a metano, resultando en un proceso de digestión anaerobia inestable e ineficiente (Tinajero y Noyola, 2006).

La aplicación de la digestión anaerobia como una tecnología para el tratamiento de desechos produce importantes beneficios más allá de la simple eliminación de éstos, con lo cual se mejora la calidad ambiental (Wilkie, 2005). La mayor desventaja de este proceso es la baja tasa de crecimiento de los microorganismos anaerobios (Olcay yKocasoy, 2004).

Un proceso anaerobio bajo condiciones controladas ofrece una solución holística para el tratamiento del estiércol porque además de estabilizar el sustrato, produce una cantidad significativa de energía en forma de biogás, reducción de olores, conservación de nutrientes, inactivación o control de patógenos y minimización del impacto al ambiente causado por la emisión de gases a la atmósfera (Carballa *et al.*, 2006; Wilkie, 2003, 2005).

Con la digestión anaerobia no se resolverían los problemas de energía, pero sí se encontraría una solución para todos nuestros desechos biodegradables agropecuarios, papel y desperdicios de alimentos, así como para los desechos municipales (Ritchie and Watts, 2005).

2.8. Potencial del metano para generar electricidad

El metano es el componente principal en los biogás; Cuando éste es quemado produce calor y electricidad (Yue *et al.*, 2010). Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, > 100 kW) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los

motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S (bajo 100 ppm) y vapor de agua. Las plantas de energía a pequeña escala del futuro para la producción de electricidad y calor con una eficiencia superior al 60% y bajas emisiones (Varnero, 2011).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del experimento.

El experimento se realizó en el Laboratorio de Agroecología, de La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, ubicada en los 25° 55´ latitud norte y 103° 37´ longitud oeste con una altura de 1127 metros sobre el nivel del mar. Durante el periodo de siete meses (del 20 de septiembre del 2011 al 30 de Abril del 2012).

3.2. Material biológico

Se utilizaron seis tipos de estiércoles: bovino, caprino, cerdo, equino, ovino y conejo. Cuatro de éstos materiales fueron recolectados de las instalaciones de la UAAAN-UL, mientras que el estiércol de ovinos se obtuvo de un establo de la Flor de Jimulco y el estiércol de cerdos del ejido San Luisito.

3.3. Preparación de los digestores.

Luego de someter las muestras de estiércol a secar a temperatura ambiente, se molieron en mortero y se pesaron 16 g colocándose en frascos de color ámbar de capacidad de 250 ml con 200 ml de agua y se sometieron a ebullición en baño maría durante un periodo de 30 y 45 minutos, se dejaron enfriar y finalmente se adicionaron 20 ml de inóculo de estiércol de conejo de una dilución de 1:10. Los frascos fueron tapados con un tapón de goma del número 20

y sellados con anillo de aluminio herméticamente. Se incluyeron tratamientos testigos sin herviren cada uno de los tratamientos.

3.4. Diseño Experimental.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones con arreglo factorial. Donde el factor A los representan los seistipos de estiércoles, y el factor B, con tres aplicaciones de calor (0, 30 y 45 min), realizado por triplicado para un total de 54 unidades experimentales.

3.5. Variables de estudio.

3.5.1. Producción de biogás.

Para determinar la cantidad de biogás generado por cada unidad experimental, cada 24 h se midió con una jeringa desechable, la cantidad de biogás generado, de acuerdo con el desplazamiento que se ejercía sobre el émbolo de la jeringa.

3.5.2. Cálculo para estimar la producción de biogás a partir de estiércol (biogás/ton sólidos totales).

Para estimar la producción de biogás total, se divide el volumen total entre el total de sólidos totales consumidos durante la duración del experimento, expresados en ml g de sólidos totales⁻¹. Posteriormente se transforman a m³ ton de sólidos totales⁻¹. Dicho valor, posteriormente se empleará para estimar los cálculos de generación de electricidad en base a sólidos totales.

3.5.3. Cálculos para estimar la producción de energía eléctrica a partir de biogás generado de la fermentación de los estiércoles.

Para estimar la producción de energía eléctrica a partir del biogás generado se debe considerar que, la composición química del biogás es mayor al 50% de metano y su poder calorífico superior (PCS) es del orden de $4,600 \text{ Kcal}\cdot\text{m}^{-3}$, lo que permitiría generar entre $1.3\text{-}1.6 \text{ KWh}^{-1}$, equivalente a medio litro de petróleo. El contenido de energía de 1 m^3 de biogás es de aproximadamente 6 KWh^{-1} , sin embargo, la eficiencia se considera a partir de $1 \text{ KWh}\cdot 0.934 \text{ m}^{-3}$ de biogás.

3.5.4. Determinación de Sólidos Totales.

Las muestras se filtraron y el sólido se colocó en papel aluminio previamente pesado y las muestras se colocaron en la estufa a 90°C por 24 horas después (hasta peso constante, la diferencia de pesos inicial (16 g) menos final, es el peso de sólidos totales utilizados en el proceso.

3.5.5. Determinación de potencial de hidrógeno (pH)

La determinación del potencial de hidrogeno se realizó utilizando el líquido restante de las muestras de estiércol, utilizando el aparato pHmetro (BOECO modelo PT-370 pH/m Vmeter).

3.5.6. Determinación de Conductividad Eléctrica (C.E.)

Esta determinación se realizó utilizando el conductímetro(ORION modelo 162) introduciéndolo en el líquido restante de las muestras de estiércol y anotando las lecturas correspondientes (Unidades).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la actualidad, los desechos orgánicos son procesados, ya sea quemándolos o mediante degradación biológica por proceso aerobio o anaerobia. La utilización inadecuada de energía proveniente de combustible fósiles se ha traducido en consecuencias negativas como el deterioro de los recursos naturales y la contaminación ambiental.

De acuerdo a los objetivos planteados, ha sido posible la obtención de biogás en seis diferentes estiércoles. El periodo de medición del biogás comenzó desde el 20 de septiembre al 20 de octubre del 2011, midiendo la producción diaria de cada uno.

4.1. Producción de biogás por semana

4.1.1. Primera semana posterior a la inoculación.

De acuerdo con los resultados encontrados, en el análisis de producción de biogás semanal, se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre los tipos de estiércol empleados (Cuadro 5), así como entre los tiempos de ebullición. Sin embargo, la interacción no fue significativa.

De acuerdo con figura 2, el mejor tratamiento para la condición control fue el estiércol de equino (79 ml), mientras que para los tratamientos de ebullición de 30 y 40 minutos lo fue el estiércol de conejo con 91.0 y 84.3 ml respectivamente, en el mismo orden, los peores tratamientos fueron para las tres condiciones, el

estiércol de caprinos (30 ml, control) y bovinos (28.3 y 36 ml), para los tratamientos de ebullición de 30 y 40 minutos.

Cuadro 5. Análisis de varianza para la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la primera semana posterior a la inoculación.

	S.C.	G.L.	C.M.	F	P
Intercept	173286.7	1	173286.7	516.5028	0.000000
Estiércol	14385.9	5	2877.2	8.5758	0.000020
Ebullición	432.7	2	216.4	0.6449	0.530688
Estiércol*Ebullición	8777.7	10	877.8	2.6163	0.016731
Error	12078.0	36	335.5		
Total		54			

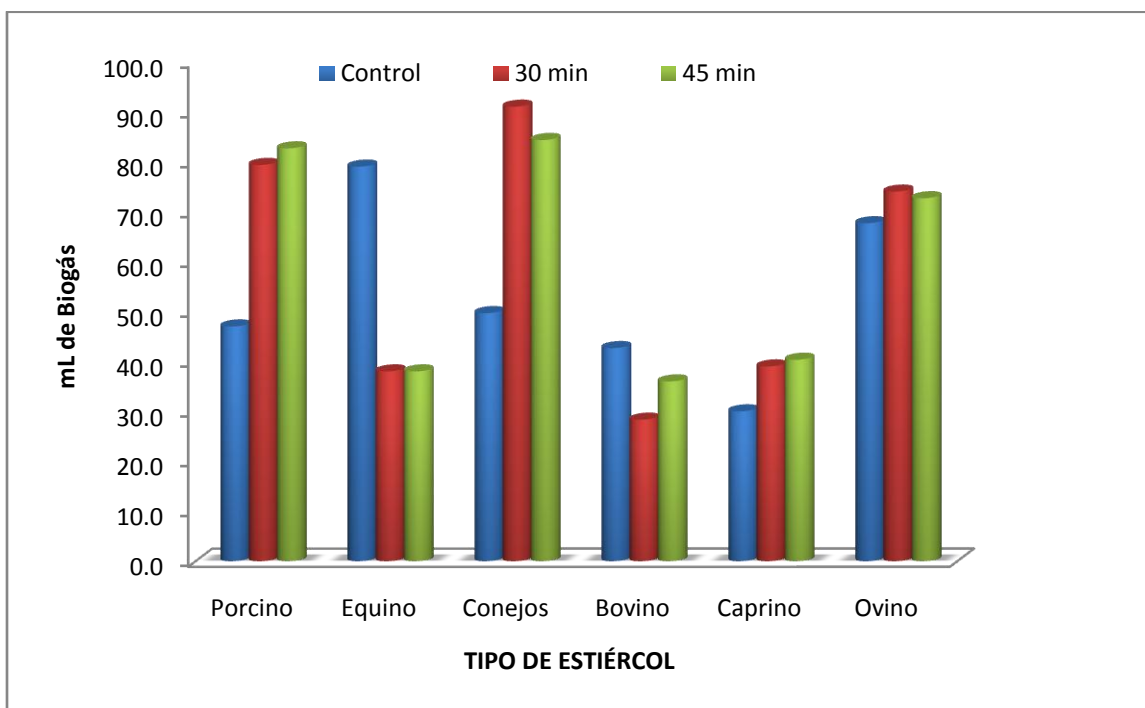


Figura 2. Producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la primera semana posterior a la inoculación.

4.1.2. Segunda semana posterior a la inoculación.

En la segunda semana de producción de biogás, los resultados de ANOVA (cuadro 6), entre tratamientos presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$).

De acuerdo con figura 3, el mejor tratamiento para la condición control fue el estiércol de equino (177.3 ml), mientras que para los tratamientos de ebullición de 30 y 40 minutos lo fue el estiércol de caprino con 68.7 y 87.7 ml respectivamente, en el mismo orden, los peores tratamientos fueron para las tres condiciones, el estiércol de ovino (34.0 ml, control) y ovino (32.7 y 31.0 ml), para los tratamientos de ebullición de 30 y 45 minutos.

Cuadro 6. Análisis de varianza para la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la segunda semana posterior a la inoculación.

	S.C.	G.L.	S.C.	F	P
Intercept	193321.5	1	193321.5	549.0355	0.000000
Estiércol	18530.8	5	3706.2	10.5256	0.000003
Ebullición	17162.1	2	8581.1	24.3703	0.000000
Estiércol*Ebullición	34376.6	10	3437.7	9.7630	0.000000
Error	12676.0	36	352.1		
Total		54			

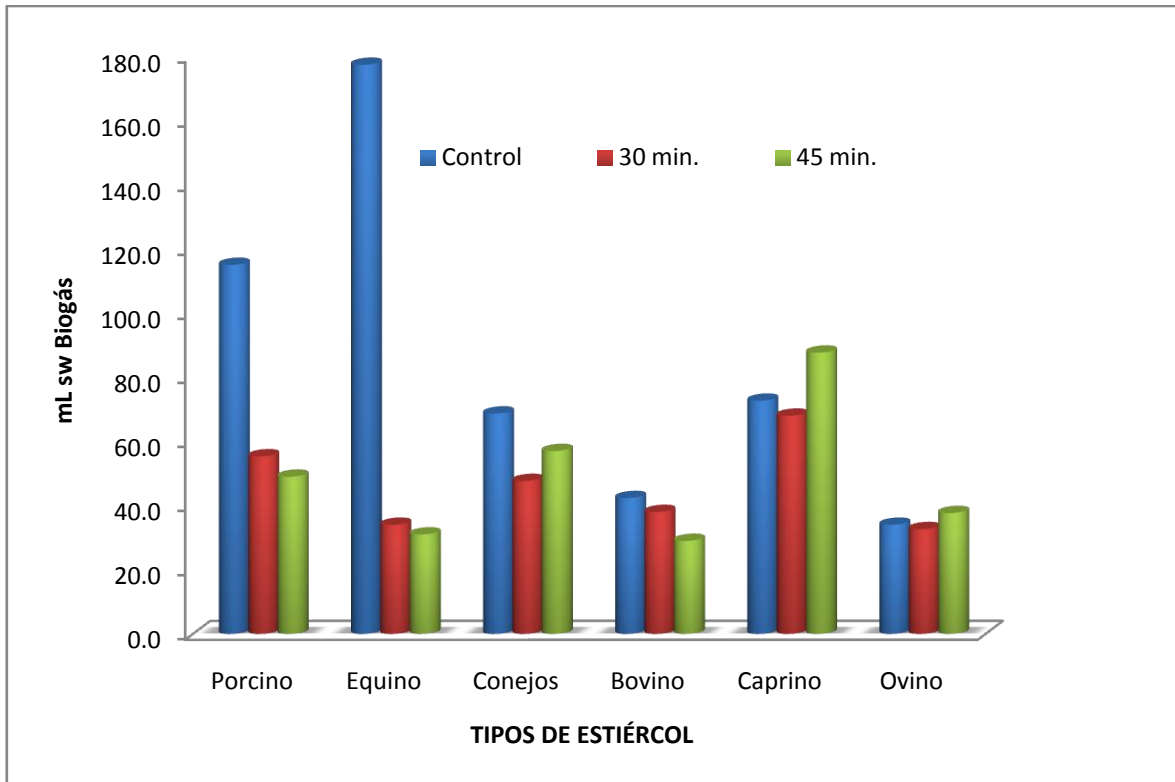


Figura3. Producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la segunda semana posterior a la inoculación.

4.1.3. Tercer semana posterior a la inoculación.

En la tercera semana de producción de biogás, los resultados de ANOVA (Cuadro 7), nuevamente encontramos, diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$).

De acuerdo con figura 4, el mejor tratamiento para la tercera semana de producción de biogás, para la condición control, lo fue el estiércol de porcino (301.7 ml), mientras que para los tratamientos de ebullición de 30 y 40 minutos lo continuo el estiércol de caprino con 201.0 y 175.0 ml respectivamente, en el mismo orden, los peores tratamientos fueron para las tres condiciones, el estiércol

de ovino (71.3 ml, control)equinoy bovino (23.7 y 17.0 ml), para los tratamientos de ebullición de 30 y 45 minutos.

Cuadro 7. Análisis de varianza para la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la tercera semana posterior a la inoculación.

	S.C.	G.L.	C.M.	F	P
Intercept	482989.8	1	482989.8	163.6545	0.000000
Estiércol	102888.1	5	20577.6	6.9724	0.000121
Ebullición	91791.4	2	45895.7	15.5511	0.000014
Estiércol*Ebullición	117899.7	10	11790.0	3.9949	0.000995
Error	106246.0	36	2951.3		

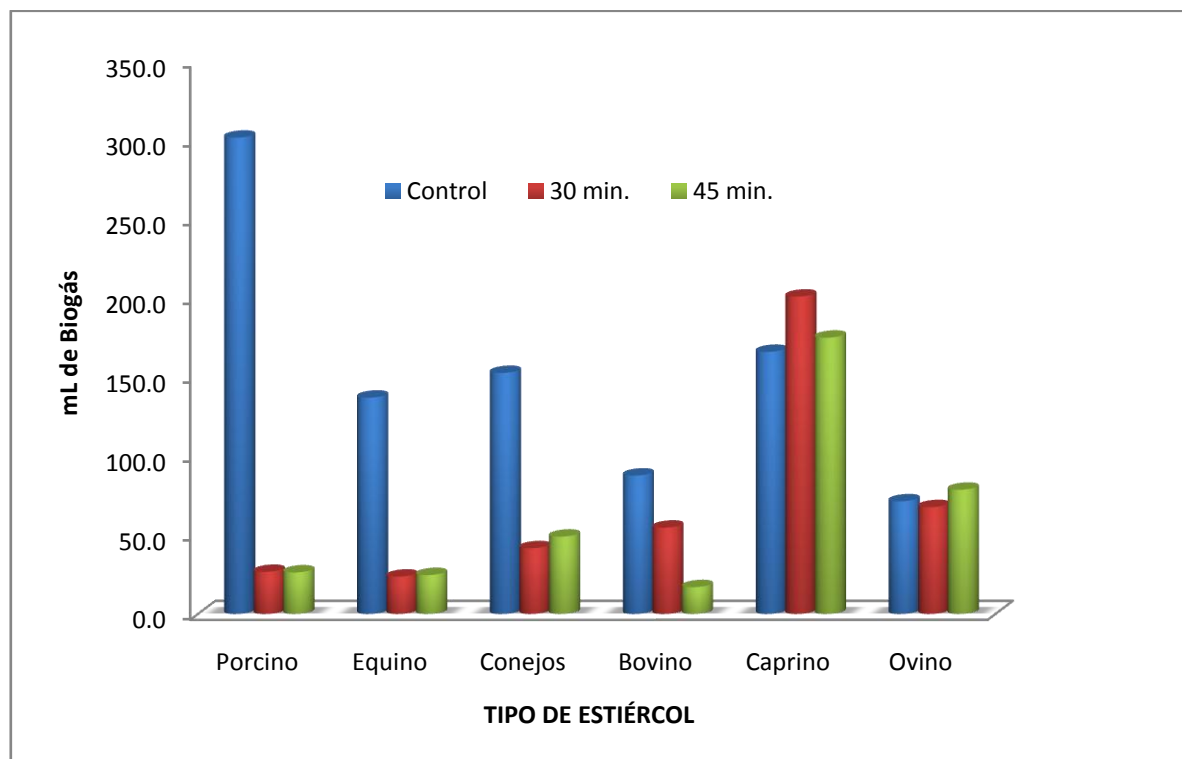


Figura 4. Producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la tercera semana posterior a la inoculación.

4.1.4. Cuarta semana posterior a la inoculación.

Para la cuarta y última semana de producción de biogás, los resultados de ANOVA (Cuadro 8), los tratamientos presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$).

De acuerdo con figura 5, el mejor tratamiento para la condición control fue el estiércol de caprino (235.3 ml), mientras que para los tratamientos de ebullición de 30 y 45 minutos lo fue el estiércol de caprino con 229.0 y 195.0 ml respectivamente, en el mismo orden, los peores tratamientos fueron para las tres condiciones, el estiércol de bovino (79.3 ml, control) equino y bovino (16.7 y 8.7 ml), para los tratamientos de ebullición de 30 y 45 minutos.

Cuadro 8. Análisis de varianza para la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la cuarta semana posterior a la inoculación.

	S.C.	G.L.	C.M.	F	P
Intercept	444811.1	1	444811.1	311.0285	0.000000
Estiércol	208480.5	5	41696.1	29.1555	0.000000
Ebullición	41269.9	2	20635.0	14.4287	0.000025
Estiércol*Ebullición	24492.7	10	2449.3	1.7126	0.115625
Error	51484.7	36	1430.1		
Total	325727.9				

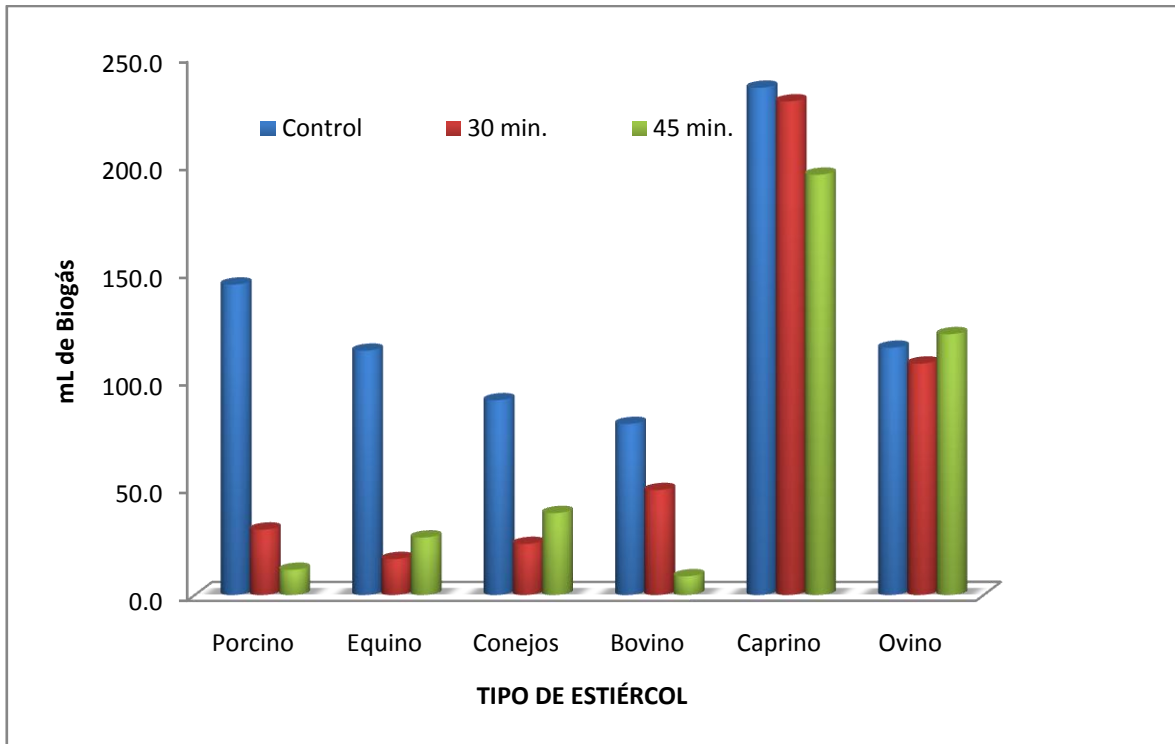


Figura 5. Producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la cuarta semana posterior a la inoculación.

4.2. Producción total de biogás

De acuerdo con el ANOVA para la producción total de biogás (Cuadro 9), nuevamente se encontraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.01$), sin embargo, no se encontró interacción entre estos.

Como se podrá observar en la Figura 6. Del tratamiento control, el mejor estiércol productor de biogás fue el de porcino (607.7 ml), mientras que el peor fue el de bovinos (252.0 ml), mientras que para los tratamientos de ebullición de 30 minutos, el estiércol de caprinos, generó la mayor cantidad (537.0 ml), mientras que el peor lo fue el de equinos (112.3 ml). El mejor tratamiento en ebullición a los

45 minutos, lo presentó nuevamente el estiércol de caprinos con 498 ml, mientras que el peor resultó el de bovinos con 90.7 ml.

Cuadro 9. Análisis de varianza para la producción total de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos.

	S.C.	G.L.	C.M.	F	P
Intercept	1229744	1	444811.1	311.0285	0.000000
Estiércol	150184	5	41696.1	29.1555	0.000000
Ebullición	94498	2	20635.0	14.4287	0.000025
Estiércol*Ebullición	94568	10	2449.3	1.7126	0.115625
Error	588386	36	1430.1		
Total	2157380	54			

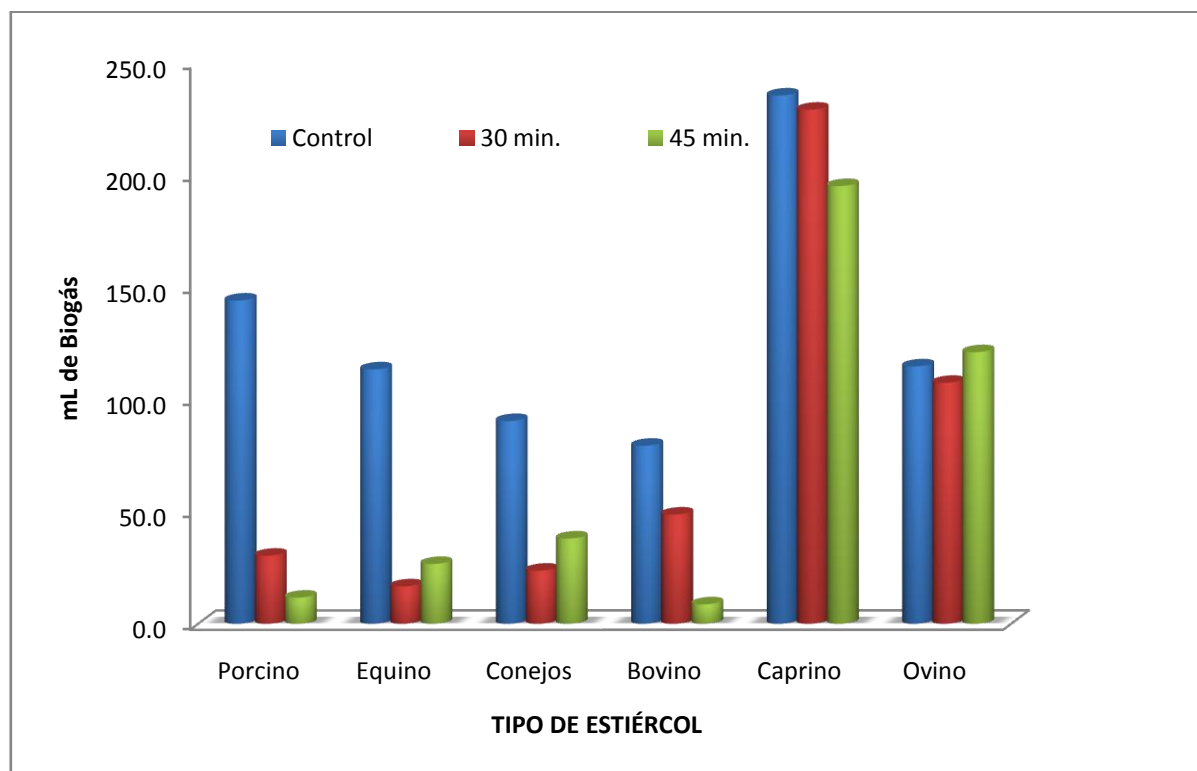


Figura 6. Producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, para la tercera semana posterior a la inoculación.

Así mismo, si observamos la evolución de la producción de biogás para los tratamientos testigos (Figura 7), destaca el estiércol de cerdo, el cual a partir de la tercera semana decae, por el contrario, en el caso del estiércol de cabra, se observa un incremento semanal, sin alcanzar al promedio máximo obtenido a la tercer semana en el caso del estiércol de porcino.

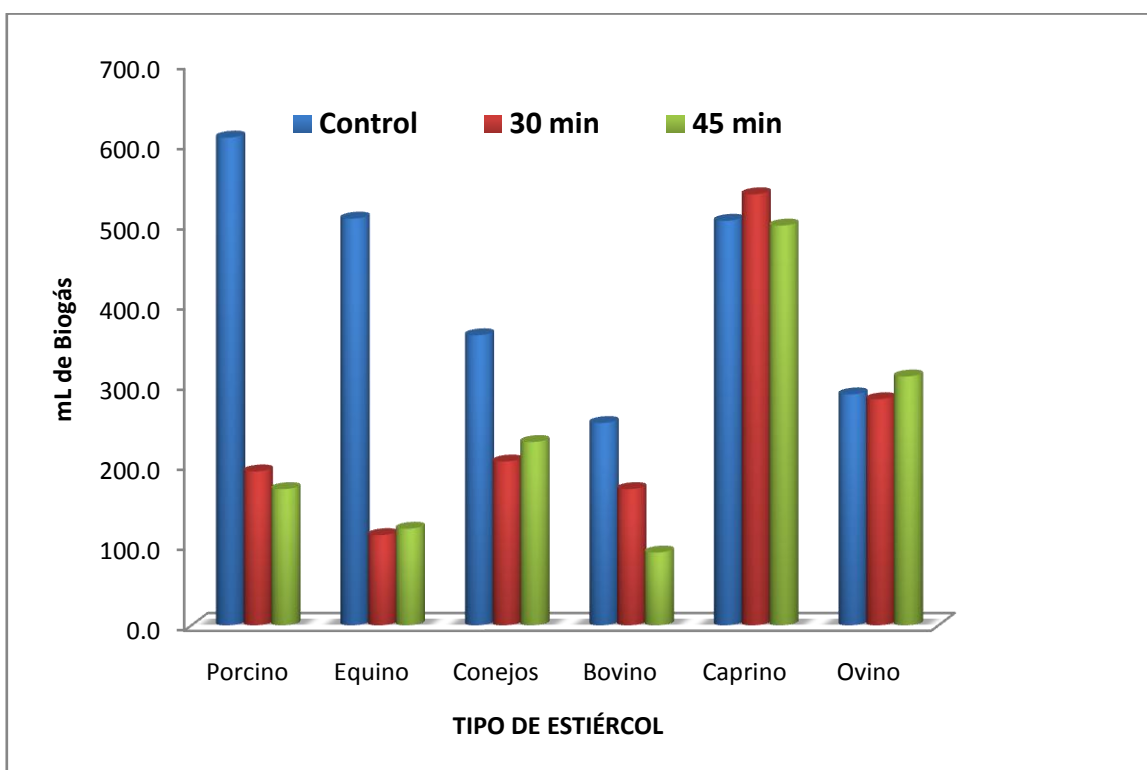


Figura 7. Producción total de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos

Por otra parte, siguiendo con la evolución de la producción de biogás para los tratamientos de 30 minutos (Figura 8), destaca el estiércol de caprino, el cual crece semana con semana, por el contrario, en el caso del estiércol de equino, se

observa como decae semana con semana, sin alcanzar al promedio máximo obtenido a la cuarta semana en el caso del estiércol caprino.

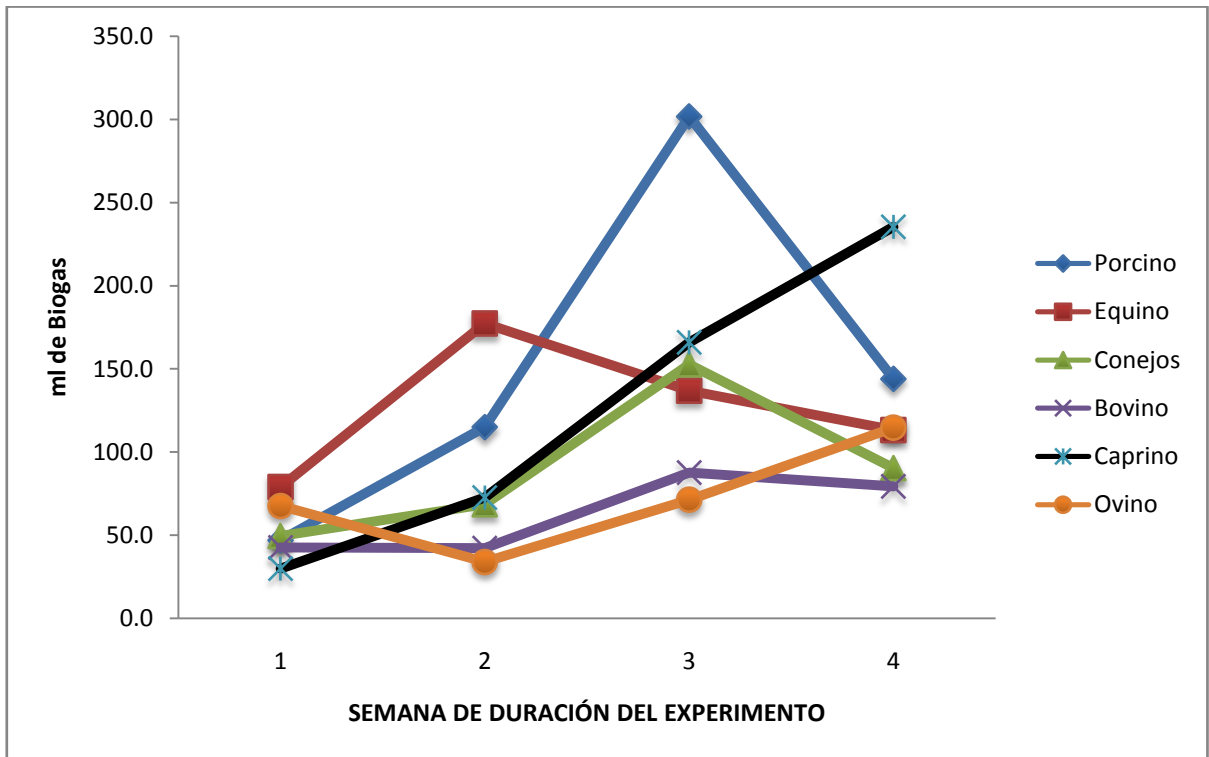


Figura 8. Evolución en la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, considerando solamente los controles.

Finalmente, al observar la evolución de la producción de biogás para los tratamientos 45 minutos (Figura 9), destaca el estiércol de caprino, el cual crece semana con semana, por el contrario, en el caso del estiércol de bovino, se observa como decae semanalmente, sin alcanzar al promedio máximo obtenido a la cuarta semana en el caso del estiércol caprino.

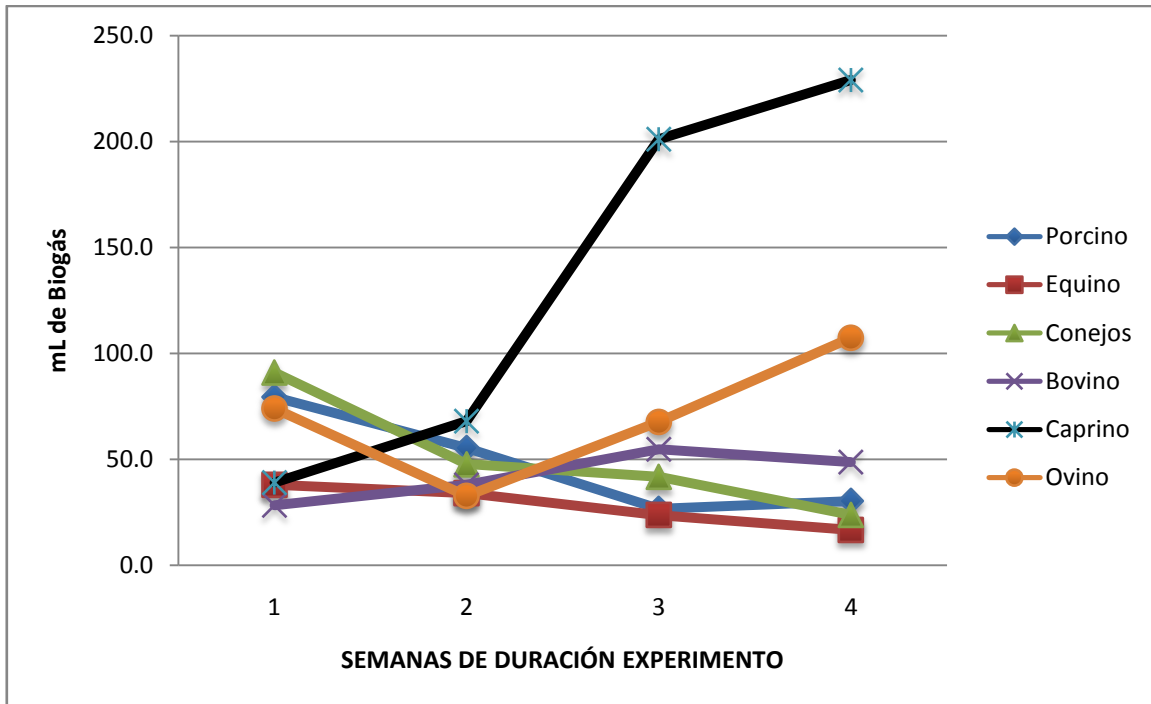


Figura 9. Evolución en la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, considerando el tratamiento de ebullición a 30 minutos.

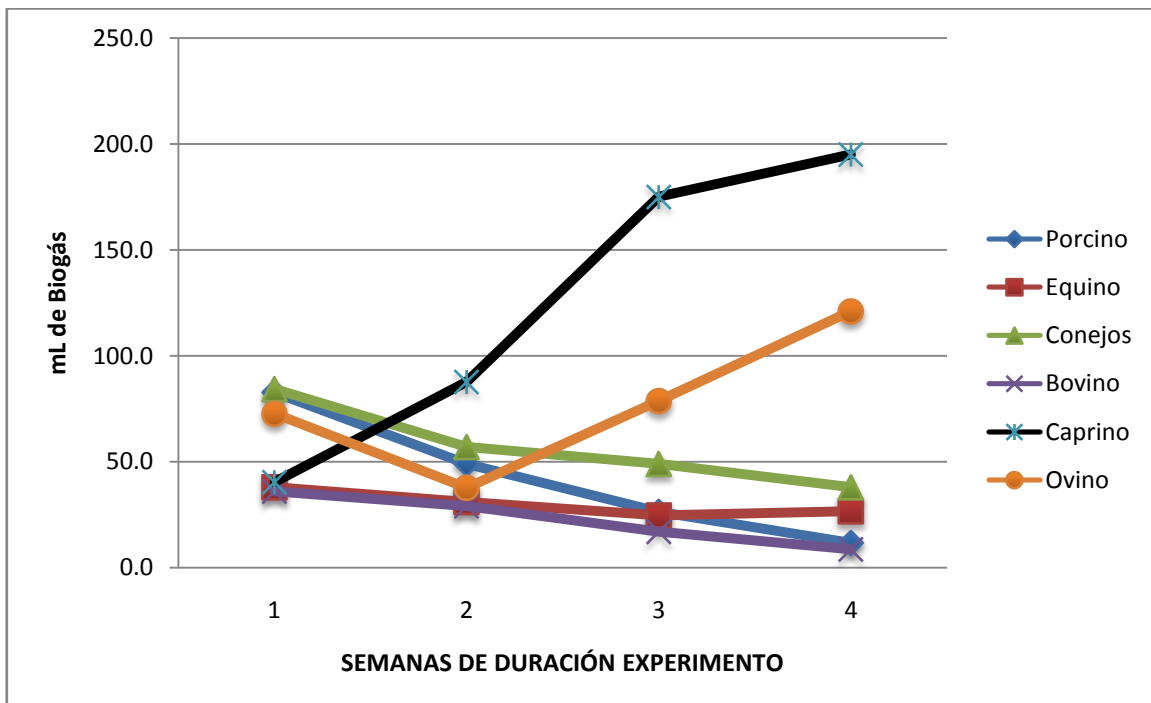


Figura 10. Evolución en la producción de biogás a partir de seis diferentes estiércoles sometidos a ebullición a tiempo 0, 30 y 45 minutos, considerando el tratamiento de ebullición a 45 minutos.

Esta variación en la producción del biogás se explica en parte por las diferentes composiciones de los estiércoles (Brecht, 2004). Así mismo, Varnero (2011) menciona que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando mayor producción de biogás. De igual forma, la relación C/N, son de las principales causas que pudieran explicar las diferencias de nuestros resultados. Otra de las características es que según los estudios realizados por Chenet *al.* (2010) las condiciones termofílicas inhiben la población microbiana en comparación con las condiciones mesofílicas.

A partir de los 10 días de producción de biogás, la concentración de CH₄, supera el 50%, lo que consideramos es importante para los procesos de transformación de electricidad, llegando hasta un 80% a los 25 días, comparado con los resultados reportados por Chenet *al.* (2010) quienes utilizaron residuos de una fábrica de jabón, de cocinas comerciales y de una cafetería universitaria, así como residuos de una empresa que maneja pescado y grasa animal; para la producción de biogás, manejando las relaciones C/N con un rango que va desde 3:1 hasta 23:1.

En la segunda semana presentó un aumento en la producción de biogás en los tratamientos sin ebullición, el estiércol equino con (177.3 ml), el porcino con (115.0 ml) mientras que el tratamiento de estiércol caprino con 45 min de ebullición mostro 87.6 ml. En la tercera semana la producción de biogás tuvo un aumento

drástico en los estiércoles que no fueron sometidos a ebullición como el estiércol de porcino quien presentó el mayor valor con 301.6 ml, conejo (152.6 ml) y el estiércol equino presenta la menor cantidad con 137.0 ml. Para la última semana, el estiércol de caprino sometido a los diferentes tiempos de ebullición fue el mejor productor de biogás con (235.3 ml) sin ebullición, (229.0 ml) con 30 min de ebullición y (195 ml) con 45 min de ebullición. Nótese que conforme aumenta el periodo de exposición al calor la cantidad de biogás se reduce, esto coincide con los estudios realizados por *Chenet al.* (2010) quienes mencionan que las condiciones termofílicas inhiben la población microbial en comparación con las condiciones mesofílicas, reduciendo la producción de biogás. Ya que estos tratamientos fueron sometidos a diferentes tiempos de ebullición.

Estos resultados difieren en mucho a lo obtenido por *Budiyono et al.* (2010) quienes a los 80 días de su experimento obtuvieron una producción total de 400 ml con una temperatura de 38.5°, es decir que la producción de los tratamientos de porcino, bovino y caprino fueron iguales con la diferencia de que solo se necesitaron 28 días para obtener la producción de biogás. Por otro lado los tratamientos de estiércol de conejo y ovino están muy por debajo de estos valores. Teniendo que el tratamiento de equino lo supera con 303.8 ml en 28 días. El tratamiento estiércol de caprino produce 3 veces más biogás con aplicación de calor de 30 minutos de ebullición, el resto de los tratamientos de estiércoles producen la mitad del valor reportado por *Budiyono et al.* (2010). Cabe mencionar que este autor solo trabajó con estiércol de bovino, e inóculo con rumen.

4.3. Producción total de biogás ($\text{m}^3\text{Ton}^{-1}\text{Sólidos Totales}$)

Haciendo una conversión de los ml de biogás total a m^3 por cantidad de sólidos totales consumidos durante el proceso (ton ST), se observan ciertos cambios respecto a encontrado en la producción total de biogás (Fig. 6). Para el caso del control, el mejor tratamiento lo presentó el estiércol de porcino ($194.8 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}\text{ST}$), mientras que el peor le correspondió al estiércol de ovino ($39.4 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}\text{ST}$, Figura 11). Para el caso de los tratamientos de ebullición a 30 y 45 minutos, el mejor tratamiento lo presentó el estiércol de caprinos (335.3 y $135.6 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}\text{ST}$), respectivamente. El promedio más bajo para la ebullición por 30 minutos, le correspondió a ovinos ($47.9 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}\text{ST}$) y a los 45 minutos de ebullición, a los bovinos ($22.5 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}\text{ST}$).

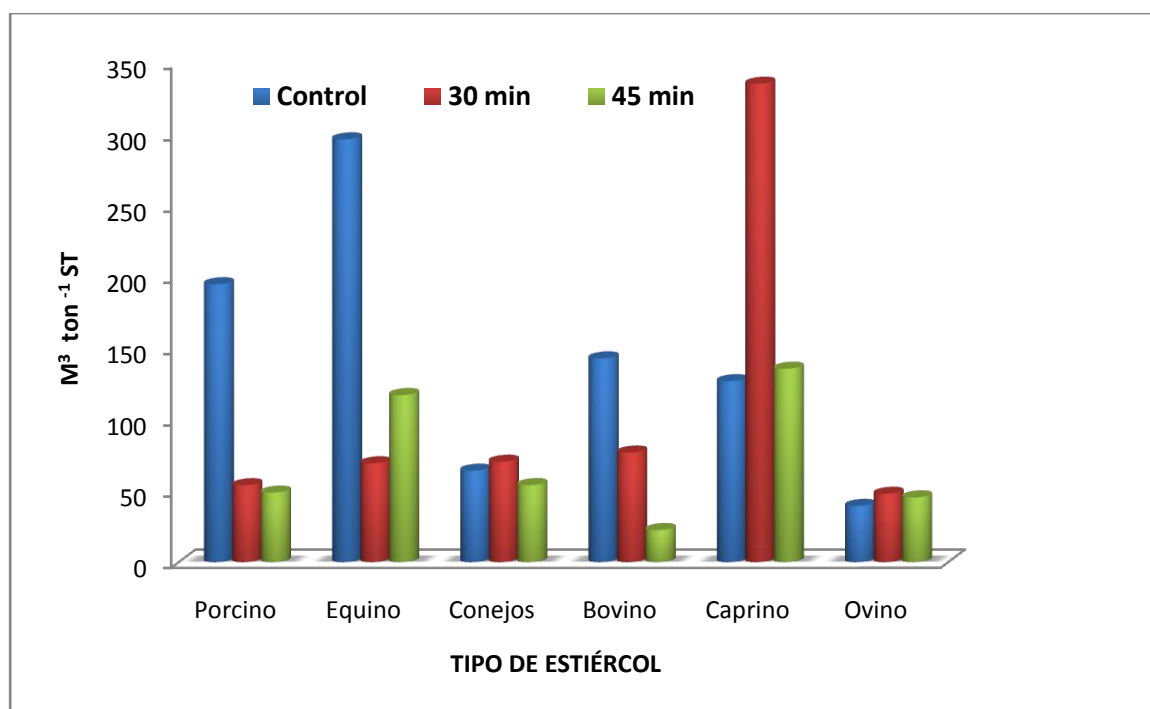


Figura 11. Producción total de biogás a partir de diferentes estiércoles considerando los sólidos totales consumidos.

Estos cambios drásticos de producción varían con el tipo de estiércol y la aplicación de temperatura a la que fueron sometidos.

4.4. Producción de electricidad (KWh·m⁻³ biogás)

El metano representa un poco más del 50% de los gases que constituyen el biogás (Yue *et al.*, 2010). Lo que hace a este un combustible con buenas características para poder ser usado en turbinas o máquinas de combustión interna que accione generadores eléctricos (Arvizu y Huacuz, 2003).

En virtud de que la capacidad de producción de electricidad está en función de los m³ de biogás que se genera, la descripción de los tratamientos es exactamente la misma que el caso anterior (Figura 12).

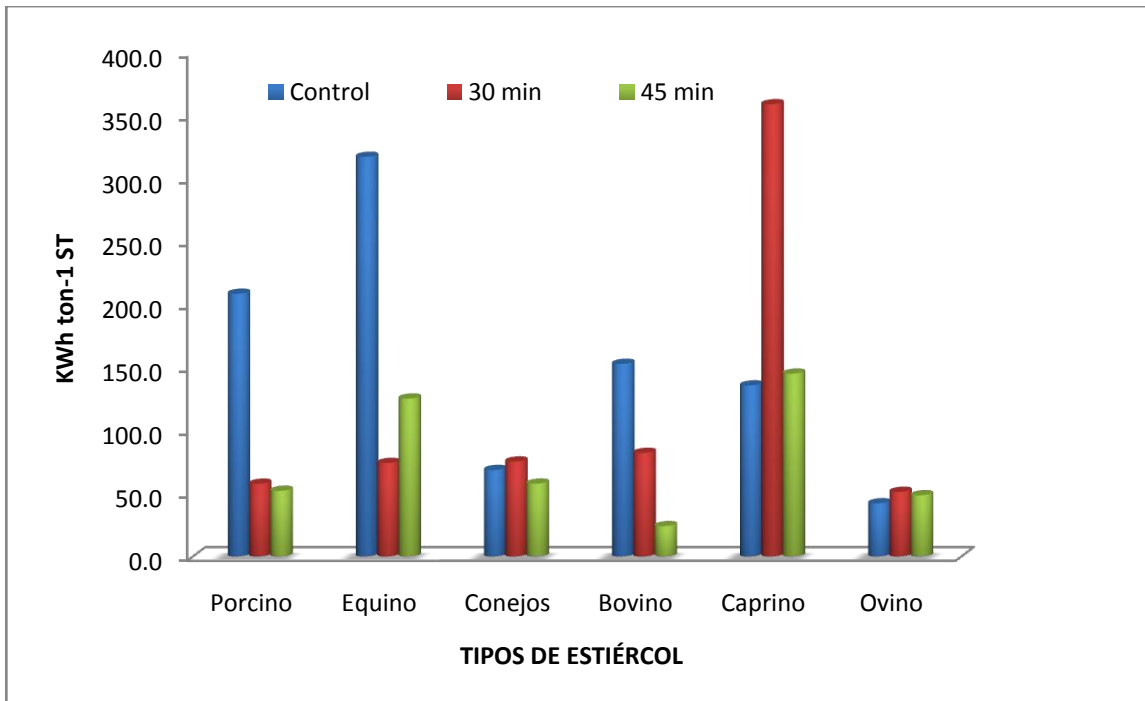


Figura 12. Producción de electricidad (KWh·Ton⁻¹ ST), por tipo de estiércol durante cuatro semanas.

Para la producción de electricidad ($\text{KWh}\cdot\text{Ton}^{-1}$ ST), los tratamientos que presentaron los más altos valores fueron los tratamientos de estiércol de caprino con 30 minutos de ebullición seguido por el tratamiento de equinos sin ebullición con 1006.2 y 888 $\text{KWh}\cdot\text{Ton}^{-1}$ ST respectivamente y el tratamiento que presentó menos producción fue el estiércol de ovino con 118.3 $\text{KWh}\cdot\text{Ton}^{-1}$ ST.

4.5. Determinación de sólidos totales.

En la Figura 13, se pueden observar, el consumo de sólidos totales por los diferentes tratamientos, destacando que el estiércol que menos sólidos utilizó, fue el de equino y el que más gasto mostró, fue el estiércol de ovino. Encontrándose diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P < 0.01$).

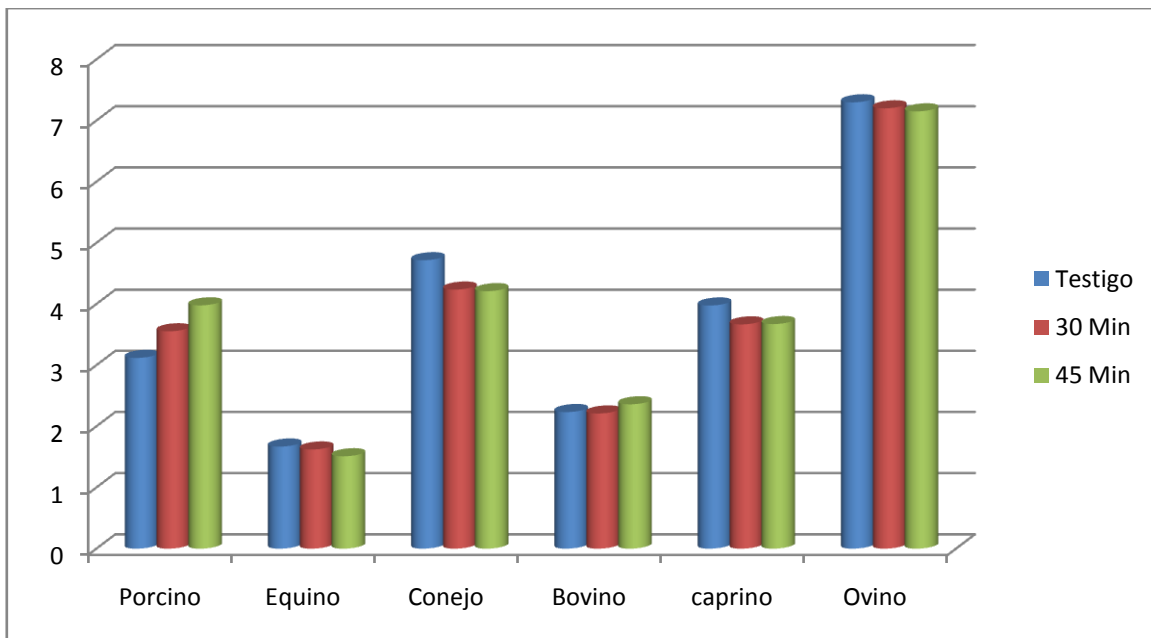


Figura 13. Determinación de sólidos totales consumidos durante el proceso de digestión anaeróbica de los diferentes estiércoles y sometidos a ebullición

Esto quiere decir que el mayor productor de biogás en ml fue el estiércol de (equino) quien necesita menor consumo de sólidos totales para producir más biogás. En comparación con el estiércol de ovino que necesitó mayor cantidad de sólidos para la producción de biogás.

4.6. Determinación de potencial de hidrógeno (pH)

Para la determinación del pH final de los tratamientos (Figura 14), los valores promedios más alto lo presentó el tratamiento de estiércol de caprino (pH=8.5) y el valor más bajo lo obtuvo el estiércol de equino (pH=6.6).

La dependencia de pH por las bacterias metanógenas, son un factor importante para la producción de biogás, ya que, su rango óptimo oscila de 6.0 y 8.0 (Varnero, 2011).

Un pH con un incremento en el rango óptimo nos indica que existe la presencia de amoníaco, y una disminución genera ácidos grasos volátiles (ácido acético, ácido propiónico, ácido butílico), ocasionando la muerte de microorganismos productores de metano (Cioablaet *al.*, 2012). 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 teniendo como consecuencia que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener

el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH (Varnero, 2011).

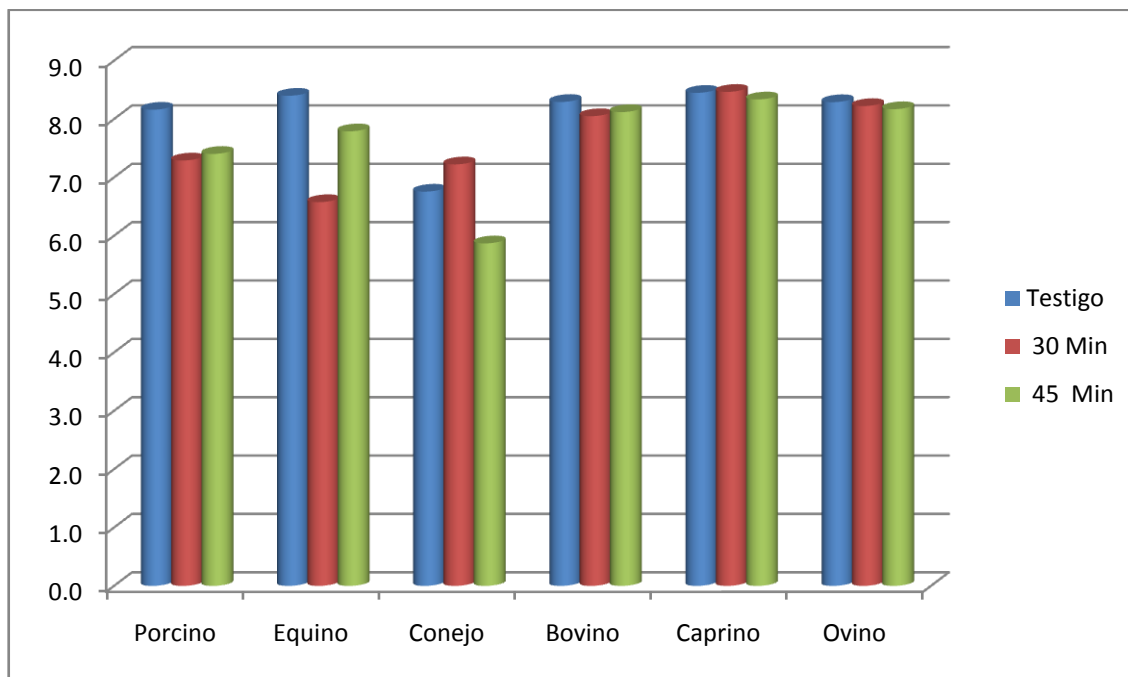


Figura 14. Determinación del pH promedio final de estiércol, sometido a diferentes temperaturas de ebullición y fermentación por 28 días.

4.7. Determinación de conductividad eléctrica (C.E.).

De acuerdo con el ANOVA (Cuadro 10), para la variable de conductividad eléctrica, se encontraron diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.01$).

Cuadro10. Resultado de ANOVA para la determinación de Conductividad eléctrica de los estiércoles evaluados a tres condiciones de ebullición.

	S.C.	G.L.	C.M.	F	P
Intercept	2365.247	1	2365.247	3308.888	0.000000
Estiércol	452.131	5	90.426	126.503	0.000000
Ebullición	18.572	2	9.286	12.991	0.000057
Estiércol*Ebullición	50.933	10	5.093	7.125	0.000005
Error	25.733	36	0.715		
Total	2912.616	54			

La conductividad eléctrica (Figura 15), con el promedio más alto le correspondió en todos los tratamientos al estiércol de conejo a control, ebullición por 30 y 40 minutos; 11.15, 11.20 y 13.97 mS cm⁻¹ respectivamente, mientras que los valores más bajos le correspondieron al estiércol de ovinos 3.87, 3.90 y 3.40 mS cm⁻¹ en orden anterior.

La C.Ese relaciona con la concentración de solutos (sales) en el bioabono. Así como también puede hacer daño para el crecimiento posterior a su aplicación a algunos microorganismos del suelo (Sánchez *et al.*, 2007).

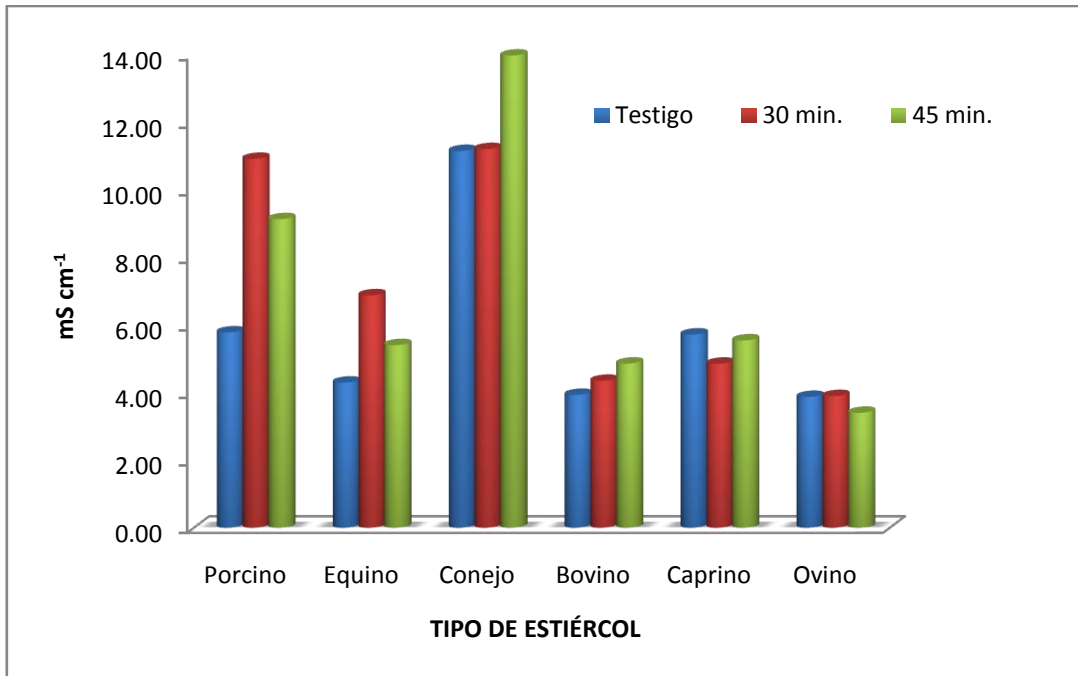


Figura 15. Resultados finales de la conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) del bioabonolíquido al final del proceso de fermentación anaeróbica de diferentes estiércoles.

V. CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados encontrados en el presente estudio utilizando diferentes tipos de estiércoles, se concluye que:

1.- Existe comportamiento diferente entre los estiércoles que son sometidos a la producción de biogás.

2.- El estiércol que mejor producción de biogás se encontró fue para el tratamiento el caprino ($335.3 \text{ m}^3\text{Ton}^{-1} \text{ ST}$) con ebullición, mientras que el tratamiento que menos produce fue el estiércol de bovino sometido a 45 min de ebullición ($22.5 \text{ m}^3\text{Ton}^{-1} \text{ ST}$).

3.- El estiércol de caprino, sometido a ebullición por 30 minutos, generó la mayor cantidad de energía eléctrica por tonelada de sólidos totales.

4.- Se encontró interacción para la producción de biogás entre los tratamientos y tiempos de ebullición, destacándose el estiércol de caprino, con alta producción en 30 minutos de ebullición.

5.- En esta investigación y de acuerdo a los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

VI. LITERATURA CITADA

- Altieri, M. A. and C. I. Nicholls. 2006. Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable. 2 ed. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Angelidaki, I., L., Ellegaard and B.K. Ahring 1993. A mathematical model for dynamic simulation of anaerobic digestion of complex substrates: focusing on ammonia inhibition. *Biotechnol Bioeng* 42:159–166.
- Anónimo, 2012. Biogás barometer. *Barometer Euroserv* 212:68-75
- Arvizu, f.j. Huacuz, V. J. 2003. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. *Boletín IIE*. 118 - 123.
- Bagudo B.U., Garba B., Dangoggo S.M. and Hassan L.G. 2011. The qualitative evaluation of biogas samples generated from selected organic wastes. *Arch. Appl. Sci. Res.* 3:549-555.
- Bernal-Calderon, M. y Gondan–Bouzada, D.M. 2007. Producción y gestión de los residuos orgánicos: situación actual a nivel mundial, comunitario y estatal. Multiprensa. Madrid, España.
- Brecht, A. 2004. Manejo ecológico del suelo. Fundación agricultura y medio ambiente. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas para América latina. Santiago de Chile.
- Botero, B.R., Preston, R.T. 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Universidad Earth. Costa Rica.
- Carballa, M., F. Omil, A. C. Alder, and J. M. Lema. 2006. Comparison between the conventional anaerobic digestion of sewage sludge and its combination with a chemical or thermal pre-treatment concerning the removal of pharmaceuticals and personal care products. *Water Sci. Tech.* 53: 109-117.
- Carmona, J. C., D. M. Bolívar, and L. A. Giraldo. 2005. El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Rev. Col. Cienc. Pec.* 18: 49-63.

- Chen X. Romano T.R. Zhang R. 2010. Anaerobic digestion of food wastes for biogas production. Department of biological and agricultural engineering.3:4.
- Cioabla, A.E., Lonel, L., Dumitrel, A.G., Popescu, F. 2012. Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues. *Biotechnology for Biofuels*, 5:39.
- Lagrange, B. 1979. *Biomethane. Principes, Techniques, Utilization*. Vol2. Edisual. *Energies Alternatives*. Pp 249.
- Gomero O. L., 2005. *Los Biodigestores Campesino*. 2005. Red de Acción en Alternativas al Uso de Agroquímicos, RAAA / RAPAL. Subregión Andina. Pp 3.
- Gliessman, S. R. 2002. *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Turrialba, Costa Rica.
- Marchaim U. 1992. *Biogas, processes for sustainable development*. FAO, Roma. Pp 232.
- Martí, H. J. 2008. *Guía de diseño y manual de instalaciones de biodigestores familiares*. GTZ Pro agro. PP. 78.
- Moreno, C. J., Moral, H. R. 2007. *Compostaje*. Ediciones Multi – Prensa, Madrid. Disponible en <http://books.google.com.mx/books>
- Nagy V. Szabo E. 2011. *BIOGAS FROM ORGANIC WASTE*. Department of Rural Development and Landscape Management Szolnok University College, Szolnok, Hungary. 21:4.
- Ofoeful A.U. 2011. Investigation of the biogas production potentials of Bambara nut chaff (*Vigna subterranea*). *Adv. Appl. Sci. Res.* 2(2) 55-61.
- Olcay, O., and G. Kocasoy. 2004. Acceleration of the decomposition rate of anaerobic biological treatment. *J. Env. Sci. Health A39*: 1083-1093.
- Park D.N. Thriing W.R. Garton P.R. Rutherford P.M. Helle S.S. 2011. *Water Science and Technology* 1851: 1856.
- Pascual, A., Ruíz, B., Gómez, P., Flotats, X., Fernández, B. 2011. Situación y potencial de generación de biogás. IDAE-AINIA- GIRO. Madrid. Pp. 104.

- Ritchie, A., and B. Watts. 2005. Why we should step on the gas Building Design. Pp. 31.
- Ruíz-Núñez. E. R. 2012. Extracción y calidad de aceite de la semilla de higuera (*ricinus communis*) para la producción de biodiesel. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México.
- SAGARPA, 2012. Utilización de estiércoles. Texcoco, México.
- Sánchez, H.R., Ordaz C.V.M., Benedicto V.G.S., Palma L.D.J. and Sánchez B. J. 2007. Chemical Characteristics of Several Vermicomposts in México. Compost Science and Utilization 15:1 Pp. 47-52.
- Soria, F. M., Ferrera, C.R., Erchevers, B.J., Alcantar, G.G., Trinidad, S.J., Borges, G.L.,
- Pereyda, P.G. 2001. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excretas líquidas de cerdo. Terra. 19:353–362.
- Tinajero, A., and A. Noyola. 2006. Increasing microbial activity in thermophilic anaerobic digestion of physicochemical sludge. Water Sci. Tech. 54: 245-251.
- Trivedi, P. C., S. Pandey, and S. Bhaduria. 2010. Text book of microbiology. Aavishkar, India
- Umetsu, K. et al. 2005. Methane emission from stored dairy manure slurry and slurry after digestion by methane digester. An. Sci. Jour. 76: 73-79.
- Varnero, M. M.T. 2011. Manual de Biogás. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.
- Verburg, P. H., and H. A. C. Denier Van Der Gon. 2001. Spatial and temporal dynamics of methane emissions from agricultural sources in china. Glob. Chan. Biol. 7: 31-47.
- Viquez J.A. 2010. Generación de energía eléctrica con biogás. Una alternativa de ahorro eléctrico para granjas lecheras y porcinas. ECAG. 52: 1-4.
- Weiland, P. 2010. Biogas production: current state and perspective. Appl. Microbiol. Biotechnol. 85: 849–860.
- Weiss A., Jerome V., Burghardt D., Likke L., Peiffer S., Hofstetter M. E., Gabler R., Freitagn R. 2009. Investigation of factors influencing biogas production in a

- large- scale thermophilic municipal biogas plant. *Appl. Microbiol.Biotechnol.*84:987-1001.
- West, J. J., and A. M. Fiore. 2005. Management of tropospheric ozone by reducing methane emissions. *Env. Sci. Tech.* 39: 4685-4691.
- Wilkie, A. C. 2003. Anaerobic digestion of flushed dairy manure. In: *Anaerobic digester technology applications in animal agriculture*, Alexandria, Virginia. p 350-354.
- Wilkie, A. C. 2005. Anaerobic digestion: Biology and benefits. In: *Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service*, Cornell University, Ithaca, NY.Pp72.
- Yue Z.,Teater C., Liu Y., MacLella J., LiaoWei. 2010. A sustainable pathway of cellulosic ethanol production integrating anaerobic digestion with biorefining.*biotechnology and bioengineering.* 105:6 Pp. 1031-1039.
- Zimov, S. A., E. A. G. Schuur, and F. S. Chapin III. 2006. Permafrost and the global carbon budget. *Science* 312: 1612-161.