

FECHA DE ADQUISICIÓN	_____
NUM. DE INVENTARIO	00104
PROCEDENCIA	_____
NUM. CALIFICACIÓN	_____
PRECIO	_____
EXST.	_____



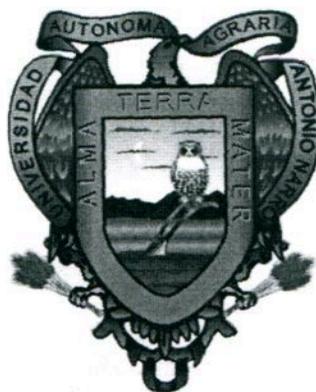
TL00104

S654  
.M371  
2006  
TESIS LAG  
Ej.1

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOABONO DE  
TRES TIPOS DE ESTIÉRCOL MEDIANTE  
DIGESTIÓN ANAEROBIA**

**PRESENTA:**

**ESTEBAN MARTÍNEZ VELÁZQUEZ**

**TESIS PROFESIONAL**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**Producción de Biogás y Bioabono de Tres Tipos de  
Estiércol Mediante Digestión Anaerobia**

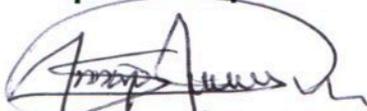
TESIS QUE PRESENTA:

**ESTEBAN MARTÍNEZ VELÁZQUEZ**

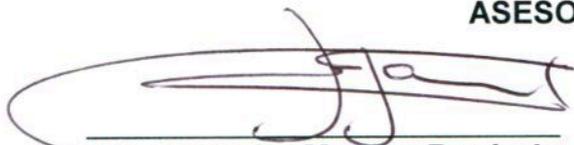
ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADA  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

Aprobada por:



**Dr. Jesús Vásquez Arroyo  
ASESOR PRINCIPAL**

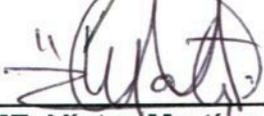


**Dr. Alejandro Moreno Reséndez  
ASESOR**



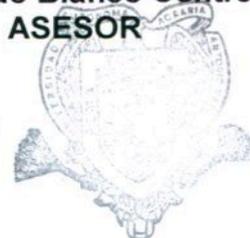
**MC. Eduardo Blanco Contreras  
ASESOR**

**Dr. Mario García Carrillo  
ASESOR**



**ME. Víctor Martínez Cueto**

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"**  
**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

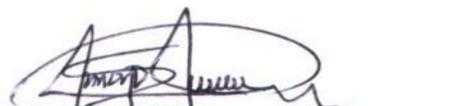
**Producción de Biogás y Bioabono de Tres Tipos de  
Estiércol Mediante Digestión Anaerobia**

**TESIS QUE PRESENTA:**

**ESTEBAN MARTÍNEZ VELÁZQUEZ**

**QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR:**

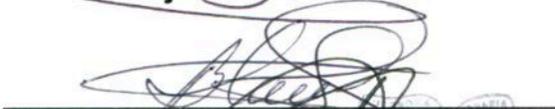
**PRESIDENTE:**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Jesús Vásquez Arroyo**

**VOCAL:**

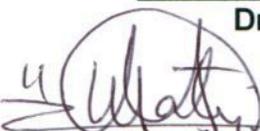
  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alejandro Moreno Reséndez**

**VOCAL:**

  
\_\_\_\_\_  
**MC. Eduardo Blanco Contreras**

**VOCAL SUPLENTE:**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Mario García Carrillo**



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

\_\_\_\_\_  
**ME. Víctor Martínez Cueto**  
**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN CARRERAS AGRONÓMICAS**

## AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a **Dios** porque me dio fuerzas y me ha permitido llegar hasta este momento con vida, salud y con un sueño realizado.

Mi más sincero agradecimiento para mis **padres y hermanos** por su comprensión y paciencia, porque me brindaron su apoyo constante de principio a fin en mi carrera profesional.

Al Ingeniero **Manuel Alvarado**. Por animarme a luchar por mis ideales y darme la mano cuando le necesité.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por las facilidades y oportunidades que me brindó para mi formación profesional, así como para la realización de este trabajo de investigación.

Mi agradecimiento especial a los **maestros de la carrera de Ingeniero en Agroecología**: al MC. Eduardo Blanco Contreras por su liderazgo y entrega, logrando los objetivos propuestos a favor de la comunidad de agroecólogos; a la Biól. Genoveva Hernández Zamudio por su capacidad y voluntad de apoyarme cuando le necesité; al Dr. Jesús Vásquez Arroyo por su excelente apoyo y asesoría en la realización de este trabajo de investigación, reconociendo su talento y aptitud para hacer las cosas; a todos los profesores con quienes conviví y quienes aportaron sus conocimientos para mi formación en este paso de mi vida.

A los **franceses** Martin Quantin y Baptiste Roy que eligieron y se unieron a este trabajo de investigación durante su estancia en la universidad Antonio Narro, cuya aportación fue muy importante para la realización de este proyecto.

A todos los **compañeros de Agroecología** que me brindaron su amistad y apoyo durante estos años en que juntos convivimos y compartimos el proyecto agroecológico; agradecimiento especial a mis principales amigos: Abel Hernández y esposa Norma Élica Rivas por su amable atención y por su fina amistad.

DEDICATORIA

A mis padres

*Sr. Esteban Martínez Estrada*

*Sra. Enedina Velázquez Olvera*

A mis hermanos

*Lázaro*

*Juana*

*José*

*Mercedes*

*Mario*

*María de Lourdes*

*Francisco*

*Claudia*

Si todo el mundo amara la Naturaleza  
como san Francisco de Asís, no existirían  
problemas ecológicos.

(Theodore Roszak)

## ÍNDICE GENERAL

<b>PRESENTACIÓN</b>	I
<b>APROBACIÓN</b>	II
<b>JURADO</b>	III
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	IV
<b>DEDICATORIA</b>	V
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	VI
<b>ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS</b>	VIII
<b>RESUMEN</b>	IX
<b>ABSTRACT</b>	X
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
Objetivos	2
Hipótesis	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b>	3
2.1. Consumo de biomasa como energía	3
2.2. Consumo de combustibles fósiles	4
2.3. El estiércol y sus aplicaciones	5
2.4. El biodigestor	7
2.4.1. Tipos de biodigestores	8
2.4.2. Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia	10
2.4.3. Evaluación económica del biodigestor	11
2.5. Tecnología del biogás: descripción del proceso de producción	12
2.5.1. Sustratos para la producción de biogás	13
2.5.2. Factores que influyen en la producción de biogás	14
2.5.3. Función de las bacterias metanógenas	15
2.5.4. Composición general del biogás	16
2.5.5. Usos del biogás	16
2.6. Bioabonos sólido y líquido generados por digestión anaerobia	17
2.6.1. Calidad del bioabono	19
2.6.2. Usos del bioabono	20

2.6.3. Comparación entre los sistemas de compostaje aerobio y anaerobio	21
2.7. Emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera	22
2.7.1. Fuentes de emisión de gases a la atmósfera	23
2.7.2. Consecuencias de las emisiones de gases de invernadero	24
2.7.3. Metano	25
2.7.4. Bióxido de carbono	28
2.7.5. Contribución regional a la emisión de gases	29
2.8. El biodigestor: ¿una tecnología apropiada para la autosuficiencia?	30
<b>III. MATERIALES Y METODOS</b>	<b>33</b>
3.1. Lugar de realización del experimento	33
3.2. Material biológico	33
3.3. Construcción de los biodigestores	33
3.4. Variables de estudio	34
3.5. Diseño experimental	37
3.6. Análisis de datos	37
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>38</b>
4.1. Análisis de la materia prima	38
4.2. Calidad sanitaria de los subproductos pecuarios	38
4.3. Producción de biogás	39
4.4. Análisis del bioabono	41
4.5. Calidad sanitaria del bioabono	42
<b>V. CONCLUSIONES</b>	<b>44</b>
<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>45</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>50</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>55</b>

## INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1. Composición del estiércol de diferentes especies de ganado	6
Cuadro 2. Composición del estiércol al inicio y de bioabono al final del proceso de digestión anaeróbica bajo condiciones de la Comarca Lagunera	38
Cuadro 3. Valores de los parámetros medidos en el bioabono líquido	41
Figura 1. Contribución (%) de diferentes fuentes a la emisión global de metano en 1998.	26
Figura 2. Producción total de biogás de cada tipo de estiércol	39

## RESUMEN

La digestión anaerobia es una estrategia importante para el tratamiento de residuos agropecuarios, que permite producir energía renovable, además de obtener abonos orgánicos y reducirse la emisión de metano y bióxido de carbono a la atmósfera. En la presente investigación se evaluaron estiércoles de bovino, caprino y cerdo para determinar la variación en la producción de biogás y la calidad sanitaria del bioabono. Los sustratos evaluados fueron analizados en sus propiedades fisicoquímicas al inicio y final del proceso. La unidad experimental (biodigestor) consistió de un contenedor plástico de 200 L, el cual fue llenado hasta un volumen del 70% de su capacidad con agua y estiércol en relación 1:1. El biogás fue colectado en cámaras de neumático para su medición. Los resultados indican que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cuanto a la producción de biogás. Sin embargo, el estiércol de bovinos generó mayor cantidad de biogás ( $3.7 \text{ m}^3$ ) y el de cerdos fue el de menor producción ( $3.0 \text{ m}^3$ ). No existió riesgo biológico del bioabono, pero sí riesgo químico por la fitotoxicidad del bioabono en proporción de 1:1 arena-bioabono.

### Palabras clave:

Metano, biodigestor

## **ABSTRACT**

Anaerobic digestion is an important strategy for treatment of agricultural residues, which to let produces renewable energy, also to obtain organic fertilizers, and the emission methane and carbon dioxide at the atmosphere are reduced. In this research were evaluated the manures of cow, goat, and swine in order to determinate the difference on biogas production and biofertilizer sanitary quality. Manure evaluated were analyzed on its physicochemical properties before and after the process. Unit experimental (biodigester) consisted of one plastic container (200 L) which was filled at 70% of its capacity with a relation 1:1 of water and manure. Biogas was collected within inner tubes to measure it. The results indicate that had not statistically significant differences were found between treatments with respect to biogas production. However, the cow manure producing the bigger quantity of biogas  $3.7 \text{ m}^3$  and the pig manure only  $3.0 \text{ m}^3$ . Biofertilizer do not have biological risk, but chemical risk exist because the bioassay of phytotoxicity was found on proportion 1:1 sand and biofertilizer.

### **Keywords:**

Methane, biodigester

## CAPÍTULO I.

### INTRODUCCION

En la actualidad existe preocupación por los niveles de pobreza rural, degradación ambiental y desintegración sociocultural que parecen estar ligados a presiones poblacionales, cambios en los patrones de consumo y penetración capitalista (Altieri y Nicholls, 2006). Con el incremento de la población mundial y la disminución de los recursos maderables aumenta la dificultad para suministrar energía a las viviendas, principalmente en áreas rurales (Laichena y Wafula, 1997) en las que todavía se utiliza la biomasa en forma de leña, carbón y subproductos agrícolas para satisfacer las necesidades de combustible. Por otro lado, la utilización inadecuada de energía proveniente de combustible fósiles se ha traducido en consecuencias negativas como el deterioro de los recursos naturales y serios problemas de contaminación ambiental que hoy en día constituyen preocupaciones muy importantes a nivel mundial (Mengjie, 2002).

El desarrollo de los países aumenta gradualmente la demanda de energía, surgiendo la necesidad de desarrollar fuentes alternativas a los combustibles fósiles, los cuales tienen una presencia limitada (Chun *et al.*, 2005). El biodigestor, herramienta usada para el tratamiento de los desechos biodegradables por digestión anaerobia, se ha propuesto como una tecnología alternativa cuyo objetivo es proporcionar energía renovable, sanidad y abonos orgánicos a los agricultores. Por lo tanto, al ser utilizado puede atenuar la presión sobre los materiales dendroenergéticos, limitar el uso de fertilizantes químicos y disminuir los problemas de contaminación.

Las energías alternativas son de suma importancia para las granjas que tienden hacia la autodependencia, lo cual también es una meta agroecológica para alcanzar la sustentabilidad. De este modo, la agroecología se perfila como una disciplina que delinea los principios ecológicos básicos para estudiar, diseñar, manejar y evaluar agroecosistemas en términos holísticos, vistos en todas sus dimensiones (Altieri y Nicholls, 2006).

## **OBJETIVO**

Determinar la variación y la calidad del bioabono y la producción de biogás con diferentes tipos de estiércol bajo las condiciones de la Comarca Lagunera.

## **HIPOTESIS**

$H_i$ . Existe variación en la producción de biogás utilizando diferentes estiércoles como sustratos en un proceso de digestión anaerobia.

$H_o$ . No hay variación en la producción de biogás utilizando diferentes estiércoles como sustratos en un proceso de digestión anaerobia.

## CAPÍTULO II.

### REVISION DE LITERATURA

#### Consumo de biomasa como energía

La biomasa en forma de leña, carbón y residuos de cosecha constituyó la cuarta fuente más importante de energía en el mundo para el año de 1990, principalmente en los países en desarrollo donde representaba más del 50% del consumo total de energía. Esto ha traído como consecuencia un drástico daño ambiental, incrementando la deforestación, la erosión del suelo y la pérdida de áreas cultivables, favoreciéndose la desertificación, la cual representa una amenaza para la base de la producción agrícola (Laichena y Wafula, 1997).

La diversidad de especies vegetales es una característica importante en el creciente optimismo de reconsiderar a la biomasa como una fuente de energía renovable (Goldstein, 2004). Los recursos forestales pueden ser conservados al aumentar la eficiencia en el uso de productos como la leña y carbón, mejorando la tecnología de las estufas o cambiando a otras fuentes o productos sustitutos de energía (Khalil-Makki y Ezeldin-Eljack, 2003).

Con la tecnología del biogás a pequeña escala se puede disponer de una alternativa de combustible para los hogares en los países en desarrollo, donde todavía se cocina quemando leña o estiércol (Ritchie y Watts, 2005). Al ser adoptada extensamente y utilizada apropiadamente, esta tecnología también tiene el potencial para mitigar los problemas ambientales causados por el uso de los recursos del bosque (Laichena y Wafula, 1997).

La energía renovable jugará un papel significativo como fuente de energía sustentable en el futuro. La creación de una política ambiental efectiva con acuerdos institucionales apropiados en los países y alianzas a nivel global permitirá un desarrollo más rápido, así como la aplicación de la energía renovable en una escala más amplia (Gururaja, 2003).

## Consumo de combustibles fósiles

El consumo de energía producida a partir de biomasa se ha ido reemplazando gradualmente por los combustibles fósiles en los países industrializados (Laichena y Wafula, 1997). Sin embargo, la combustión de éstos crea una serie de efectos adversos al ambiente, como la contaminación del aire, el agua y el suelo, y si no se implementan acciones de solución, estos problemas seguirán empeorando mientras la demanda general de energía continúa creciendo (Gururaja, 2003).

El desarrollo de energías renovables ayudará a reducir el consumo de combustibles de origen petroquímico y la polución que ocasionan, pues el petróleo está vinculado virtualmente con cualquier otra fuente no sostenible de energía en la producción agropecuaria (Gliessman, 2002). Después de varios años de pruebas, se ha demostrado que los biodigestores no solo producen energía limpia, también tienen una contribución importante para la protección del ambiente en áreas rurales, pues se reduce el uso de gas natural y la extracción de recursos dendroenergéticos del bosque (Mengjie, 2002). El metano, componente del biogás producido a partir de desechos de los animales, es un claro sustituto del carbón y de otros combustibles fósiles, los cuales afectan negativamente la calidad del aire (Borole *et al.*, 2006).

Tanto el gas propano como el butano tienen un alto valor calorífico y un porcentaje de combustión mayor que el biogás. Por lo tanto, los quemadores estándar de gas comercial propano o butano no pueden ser usados con biogás, a menos que hayan sido modificados de alguna manera (Laichena y Wafula, 1997).

Mejorando la eficiencia de la conversión de energía y sus aplicaciones o uso final se puede reducir el consumo de ésta, y con ello mejorar la calidad del aire y la salud a nivel local, además de reducir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Gururaja, 2003).

Los combustibles obtenidos a partir de biomasa han sido propuestos como sustitutos de los combustibles fósiles a fin de afrontar su carencia en el futuro y las negativas consecuencias que éstos provocan en el ambiente (Ulgiati, 2001).

Mientras más tiempo tardemos en desarrollar o aplicar alternativas de usos de fuentes de energía con base ecológica, más vulnerables serán nuestros sistemas de producción de alimentos en el futuro (Gliessman, 2002).

### **El estiércol y sus aplicaciones**

Una práctica usada por mucho tiempo, tanto en sistemas agrícolas convencionales como alternativos, ha sido la aplicación de estiércol al suelo para mejorar su contenido de materia orgánica o como fuente de elementos nutritivos para los cultivos, sin embargo, se ha demostrado que la aplicación directa del estiércol también provoca problemas como malos olores, presencia de moscas en el campo de cultivo y pérdidas de nitrógeno (Gliessman, 2002), además, puede existir el riesgo de incrementar los niveles de microorganismos indeseables, causando efectos adversos en la higiene y calidad nutricional de los cultivos desarrollados en los lugares donde se realiza la incorporación (Johansson *et al.*, 2005). En la Florida de Estados Unidos de Norteamérica (USA), el sistema de manejo del estiércol más comúnmente usado, consiste en asperjarlo directamente sobre el suelo para suministrarle los nutrimentos necesarios en la producción de cultivos forrajeros. Ésta es una forma efectiva para el reciclado de nutrientes, pero tiende a intensificar los malos olores en los campos de cultivo (Wilkie, 2003). Este sistema es muy utilizado también en México, principalmente en las regiones potencialmente ganaderas.

Adicionalmente, la contaminación del agua y los alimentos por microorganismos presentes en el estiércol ha sido un problema importante en la salud pública, para lo cual es necesario proponer y operar sistemas de tratamiento de estos subproductos, a fin de evitar que esto suceda (Hess *et al.*, 2004).

Actualmente se usan varios sistemas de manejo y tratamiento para el estiércol y otros desechos biológicos, hay sistemas anaerobios, entre ellos los biodigestores, lagunas y suelos anegados; y sistemas de procesamiento aerobios como el compostaje, vermicompostaje y su aplicación directa al suelo (Adler y Sikora, 2005). Un sistema óptimo de manejo del estiércol debería proveer un

método sustentable diseñado para minimizar los impactos ambientales y maximizar la recuperación de recursos (Wilkie, 2003).

El estiércol generado en las explotaciones intensivas de ganado ha sido utilizado por décadas para la producción de metano, sin embargo, comúnmente surgen problemas como fallas del digestor (Borole *et al.*, 2006). Dentro de la granja, la digestión anaerobia también estabiliza el estiércol y lo convierte en abono, con lo cual es posible almacenarse más fácilmente y por periodos más largos, además de reducir los costos de manejo (Wilkie, 2005).

La composición química del estiércol varía de acuerdo al tipo de animales que se trate y en función de la dieta del ganado (INIFAP, 2005). Como se puede observar en el Cuadro 1, la gallinaza presenta en general el mayor contenido de N, así como de fósforo y magnesio.

Cuadro 1. Composición del estiércol de diferentes especies de ganado.

Elemento	Tipos de estiércol			
	Bovino	Gallinaza	Porcino	Ovino
Nitrógeno (%)	2-8	5-8	3-5	3-5
Fósforo (%)	0.2-1.0	1-2	0.5-1.0	0.4-0.8
Potasio (%)	1-3	1-2	1-2	2-3
Magnesio (%)	1.0-1.5	2-3	0.08	0.2

La degradación biológica del estiércol, es una alternativa atractiva para su aplicación directa al suelo, pues se reduce el peso, volumen, y por lo tanto, el costo de transporte (Hao *et al.*, 2004). Esta reducción se produce durante el proceso de degradación de los materiales orgánicos debido a la descomposición de los componentes orgánicos estructurales y a la mineralización de la materia orgánica para formar CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (Breitenbeck y Schellinger, 2004).

## El biodigestor

El biodigestor puede definirse como un depósito cerrado herméticamente en el que se fermenta materia orgánica mediante una serie de reacciones biológicas llevadas a cabo por microorganismos o enzimas que se encuentran dentro del mismo. Dentro del biodigestor se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia, del cual se obtiene un material volátil denominado biogás y un abono orgánico al final del proceso.

Los digestores anaerobios pueden ser construidos con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico y se pueden usar para procesar efectivamente los desechos orgánicos de los animales y colectar el biogás liberado de éstos (Borole *et al.*, 2006). Esta avanzada tecnología es conocida como digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso metanogénico utilizado para la descomposición de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno que involucra una mezcla asociada de diferentes microorganismos anaerobios como por ejemplo las bacterias de los géneros *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcinas* que transforman los residuos en biogás (Rodríguez *et al.*, 2006; Wilkie, 2005) y abonos orgánicos de manera espontánea (Iglesias-Vázquez, 2002). Este proceso biológico es ideal para el tratamiento de los desechos orgánicos (Resch *et al.*, 2006).

La digestión anaerobia permite aprovechar el potencial de energía de los residuos de cosecha y los subproductos agropecuarios (Svensson *et al.*, 2005). Debido a estas razones, en los sistemas agrícolas se aprecia el papel del biodigestor desde una perspectiva mucho más amplia, principalmente por su aplicación para el reciclado de los nutrientes de las plantas. Esto se debe a la creciente importancia de usar en forma sostenible los recursos naturales (Preston, 2005). Lo anterior es importante para la difusión de esta ecotecnología en las granjas, además, los productores tienen la reputación de ser innovadores y experimentadores, con voluntad de adoptar nuevas prácticas cuando perciben que pueden tener algún beneficio (Gliessman, 2002).

En algunos países el número de sistemas de producción de biogás a gran escala se está incrementando, la mayoría de ellos operan en rangos de temperatura mesofílica (Vinnerås *et al.*, 2006). Adicionalmente en estudios recientes se ha demostrado un nuevo proceso de digestión anaerobia de alto desempeño con ozonización como una alternativa para lograr una mayor eficiencia en la degradación biológica de sólidos (Yasui *et al.*, 2005a).

### **Tipos de biodigestores**

El hombre, de acuerdo a la aplicación del gas, las características del material a ser digerido, las exigencias en cuanto a la descontaminación a lograr y la cantidad de materia prima disponible ha diseñado y evaluado diversos tipos de digestores a lo largo del desarrollo de la tecnología del biogás. Los productores agropecuarios han jugado un papel importante en el proceso de innovación de los biodigestores, dando como resultado el desarrollo de diferentes modelos sencillos y prácticos, que no requieren demasiado estiércol para su operación y utilizan materiales disponibles en la región (Gomero-Osorio, 2005; Wilkie, 2003).

La mayor parte del trabajo para el desarrollo de los biodigestores se ha enfocado desde el punto de vista de la ingeniería, con el fin de optimizar la producción de biogás y su eficiencia al mejorar el diseño y la construcción del biodigestor. El costo relativamente alto de estos sistemas, y el hecho de que su construcción sólo puede ser realizada con éxito por técnicos calificados, han sido los principales impedimentos para su adopción generalizada (Preston, 2005).

Los biodigestores se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios tales como la sencillez o la complejidad de su construcción, la eficiencia en la operación y el costo de los mismos. La clasificación más usual está basada en la forma de carga del biodigestor con los desechos que se van a descomponer. Dentro de este orden se tienen los sistemas de carga discontinuos o tipo batch y los sistemas continuos o semicontinuos (Ramón *et al.*, 2006).

**Sistema de flujo continuo.** En este tipo de biodigestores, el biogás es almacenado sobre el fermentador y el material residual es depositado en un

estanque abierto para luego ser utilizado como abono orgánico. El biodigestor es alimentado regularmente con un determinado volumen de agua y biosólidos, y a través de un sistema de bombeo se le retira el mismo volumen de agua del material residual. La mayor parte de los digestores difundidos a lo largo de todo el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio (ISAT, 1999). Los componentes básicos que forman este sistema son una pileta de carga (entrada), el digestor, la campana de almacenamiento del gas, la salida del gas y la pileta de descarga o salida del efluente.

**Sistema discontinuo.** También llamado biodigestor en lote o tipo batch, se llena completamente una vez, se sella y se vacía por completo después de un tiempo de retención cuando la biomasa haya dejado de producir gas. Puede ser con o sin agitación y requiere para acelerar su arranque de una proporción de inóculo del 20%. Su curva de producción de gas sigue la característica de arranque-estabilización-agotamiento; el abastecimiento continuo de biogás con estas plantas se logra con depósitos de gas o con varios digestores funcionando a la vez, operando cada uno de ellos en diferente etapa. Este tipo de digestores son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida (ISAT, 1999).

Los biodigestores también pueden clasificarse por su modelo. La mayoría de las plantas de biogás difundidas en el mundo pertenecen a dos tipos de diseño, cuyos nombres derivan de los países en los cuales se realizaron los primeros modelos y posteriormente se les dio una difusión masiva. Estos son el modelo Chino (planta de cúpula fija), cuya forma se asemeja a una esfera y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene desplazando el líquido en digestión hacia una cámara llamada de hidropresión; el modelo Hindú (plantas de cilindro flotante) que posee una cámara de digestión de forma cilíndrica sobre la cual flota la campana de gas. Este digestor demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es por lo general, el componente más caro del equipo (ISAT, 1999).

En China se construyó un biodigestor dentro de un invernadero, la construcción de un chiquero para cerdos también se realizó dentro de éste. En esas condiciones, el digestor puede operar fácilmente aún en épocas de frío y en áreas frías, las plantas y los puercos se complementan con el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> de unos y otros (Mengjie, 2002).

### **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 (Umetsu *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 de empleos (Rilchie 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); las desventajas que limitan a éste son la dificultad para su control, poca calidad del efluente y baja estabilidad del proceso que produce una concentración alta de propionatos (Angelldaki *et al.*, 2006).

La reducida eliminación de sólidos volátiles y la acumulación de ácidos grasos volátiles, principalmente ácido propiónico, disminuyen la capacidad de amortiguamiento de los sistemas anaeróbicos, con riesgo de reducir el pH y lograr una baja conversión de residuos orgánicos 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 orgánicos 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 reducida tasa de crecimiento inicial de los microorganismos anaerobios (Olçay y Kocasoy, 2004).

Un proceso anaerobio bajo condiciones controladas ofrece una solución holística para el tratamiento de los desechos orgánicos porque además de estabilizar los sustratos, produce una cantidad significativa de energía en forma de biogás, reduce los olores, conserva los nutrientes, inactiva o controla patógenos y minimiza el impacto al ambiente causado por la emisión de gases a la atmósfera (Carballa *et al.*, 2006; Wilkie, 2003, 2005).

Con la digestión anaerobia probablemente no se resolverán todos los problemas de energía, pero si se encontraría una solución para los residuos biodegradables agropecuarios, así como para los desechos municipales (Ritchie y Watts, 2005).

### **Evaluación económica del biodigestor**

En el pasado, los biodigestores fueron considerados principalmente como una manera de producir gas combustible a partir de residuos de materia orgánica. Actualmente, debido a la creciente importancia del uso sostenible de los recursos naturales en los sistemas agropecuarios, se aprecia el papel de los biodigestores en una perspectiva mucho más amplia y, específicamente, por su aplicación potencial para el reciclaje de los elementos nutritivos para las plantas. Esto puede contribuir en la reducción de la dependencia tanto de los fertilizantes sintéticos como del gas comercial (Preston, 2005). Estas ventajas se traducen directamente a beneficios prácticos y económicos que contribuyen a la sustentabilidad a largo plazo (Wilkie, 2005).

A la hora de realizar el balance económico de la implantación de un sistema de producción de biogás, hay que considerar por un lado todos los beneficios asociados a dicha actividad y por el otro, todos los gastos. Dentro de los beneficios se encuentra el valor del propio biogás, la posible revalorización de los residuos tratados, tras ser sometidos a la digestión anaerobia, y los gastos que desaparezcan al implantar el aprovechamiento del biogás. Entre los costos del

biodigestor cabe destacar la inversión inicial para adquirir los materiales o equipos necesarios, los gastos asociados al propio proceso de digestión, los gastos de mantenimiento y reparación de la instalación, la mano de obra y los gastos asociados al aprovechamiento del biogás una vez obtenido (Ramón *et al.*, 2006). El mantenimiento y control del proceso de digestión de los residuos orgánicos es relativamente simple, los costos incluyen el manejo y calefacción de éstos favoreciendo el uso de grandes plantas centralizadas que digieren grandes cantidades de desechos (Svensson *et al.*, 2005).

En este año 2006, se construyeron varias plantas de biogás en la Comarca Lagunera a fin de reducir la emisión de gases a la atmósfera, todas ellas financiadas por Naciones Unidas y la compañía internacional AgCert. El proyecto consistió en la instalación de 28 biodigestores en granjas lecheras con más de 700 vacas. El tamaño de esas plantas es de 80 m de largo, 40 m de ancho y 7 m de profundidad, y su costo fue de 150 mil dólares, el cual incluye la construcción, la instalación de un equipo medidor del gas y el quemador. Por otra parte, la investigación llevada a cabo en la UAAAN, está enfocada para la aplicación de esta tecnología a pequeña escala en el medio rural para que los campesinos puedan producir su propia energía y logren un mejor nivel de autosuficiencia. El costo de los biodigestores utilizados en esta investigación fue de \$ 510.00, que incluye el valor del contenedor, la cámara, la manguera y demás accesorios.

### **Tecnología del biogás: descripción del proceso de producción**

El proceso de fermentación anaerobia incluye la acción de microorganismos metanógenos destacando las bacterias de los géneros *Methanosarcinas*, *Methanobacillus*, *Methanobacterium* y *Methanococcus*, las cuales descomponen los materiales orgánicos en ausencia de oxígeno, produciendo principalmente metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La mezcla de estos dos componentes es conocida como biogás (Laichena y Wafula, 1997). Este proceso, generalmente consiste de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Esos procesos habitualmente tienen algunas desventajas como el largo tiempo de

retención, la baja eficiencia para la eliminación de los desechos orgánicos, que además pueden ser inestables (Iglesias-Vázquez, 2002; Park *et al.*, 2005).

Un sistema de digestión anaerobia donde se descomponen residuos orgánicos es igual que un relleno sanitario pero de manera controlada, en el cual se produce metano o biogás (Ritchie y Watts, 2005). Para lograr lo anterior, en el caso de un biodigestor en lote (tipo batch), se vierte una mezcla de estiércol fresco y agua en una proporción de uno a uno y se deja fermentar por un periodo de dos a tres meses, dependiendo de las condiciones ambientales (Gomero-Osorio, 2005).

En el caso de los lodos residuales, la digestión anaerobia es un proceso fundamental para la reducción y estabilización de sólidos orgánicos (Carballa *et al.*, 2006). Sin embargo, se ha reportado que la hidrólisis enzimática de sólidos es de baja velocidad, limitando la eficiencia en su degradación. Para aumentar esta eficiencia, muchos investigadores se han enfocado ha diseñar métodos de pretratamiento de los residuos orgánicos para aumentar la hidrólisis (Goel *et al.*, 2003).

El proceso de transformación que se realiza usando el biodigestor es en cierta forma una copia de lo que ocurre en la naturaleza cuando a biomasa enterrada durante millones de años se descompone bajo condiciones anaeróbicas, generando importantes yacimientos de gas natural o biogás (Felipe-Morales y Moreno, 2005).

### **Sustratos para la producción de biogás**

El biogás es generado por fermentación anaerobia del estiércol animal y de diversos sustratos orgánicos (González-Avalos y Ruiz-Suárez, 2001). Este proceso anaerobio tiene el potencial para tratar los residuos de la agricultura, los desechos biodegradables municipales e industriales y la fracción orgánica putrescible de los lodos residuales (Smith *et al.*, 2005). Cerca del 90% de la fracción orgánica biocegradable de un desecho puede ser estabilizada con el tratamiento anaerobio y convertida a gas metano (Olcay y Kocasoy, 2004; Wilkie, 2005).

Los residuos de cultivos agrícolas representan un gran potencial de energía que no se ha aprovechado, pues éstos podrían utilizarse para la producción de metano por medio de la digestión anaerobia (Svensson *et al.*, 2006). Esta tecnología también puede adaptarse para tratar en forma anaerobia los subproductos animales como los desechos de los mataderos y de las industrias procesadoras de carne (Resch *et al.*, 2006). Además, puede aplicarse a muchos desechos biodegradables tales como las cajas de cartón, los desperdicios de jardín y el papel constituyen casi la mitad de los desechos municipales, los cuales al ser depositados en rellenos sanitarios producen gas metano durante el proceso de descomposición anaerobia (Ritchie y Watts, 2005).

### **Factores que influyen en la producción de biogás**

Los requerimientos básicos para la producción de biogás son un ambiente anaerobio (ausencia de oxígeno), adecuada concentración de nutrimentos (5-10% de sólidos totales), temperatura óptima (20-40 °C), pH dentro de los límites tolerables (6.6-7.6) y ausencia de materiales tóxicos o en concentraciones suficientemente bajas (Laichena y Wafula, 1997). La época del año también tiene un efecto significativo sobre la cantidad de biogás producido a partir de estiércol, durante los meses más cálidos se produce mayor cantidad de biogás que en los meses más fríos (Khalil-Makki y Ezeldin-Eljack, 2003).

Por otro lado, inicialmente las altas concentraciones de sólidos (sólidos totales) pueden inhibir el proceso (Angelidaki *et al.*, 2006). De igual manera, en etapas tempranas del proceso de digestión, los ácidos orgánicos inhiben el desarrollo de las bacterias descomponedoras (Olcay y Kocasoy, 2004).

En sistemas de digestión anaerobia completamente mezclados con tiempos de retención relativamente cortos, puede haber desequilibrio debido a una pobre composición de los sustratos, sobrecarga de los mismos, acumulación de sustancias inhibitorias o presencia de contaminantes antropogénicos, que pueden inhibir la actividad de los organismos y causar serios problemas en el funcionamiento del sistema (Sundh *et al.*, 2003).

## **Función de las bacterias metanógenas**

El proceso de digestión anaerobia involucra una mezcla compleja de microorganismos simbióticos que actúan en ausencia de oxígeno transformando los materiales orgánicos en biogás, nutrientes y material celular adicional. Estos microorganismos pertenecen a los géneros *Methanobacterium*, *Methandespirillum*, *Methnobacillum*, *Methanococcus* y *Methanosarcina* (González-Avalos y Ruiz-Suárez, 2001; Wilkie, 2005), y pueden alcanzar una conversión de hasta un 90% de la porción degradable de los subproductos orgánicos (Olcay y Kocasoy, 2004). A través de una acción integrada estos microorganismos desarrollan el proceso en diferentes pasos degradando los carbohidratos poliméricos, proteínas y grasas (Sundh *et al.*, 2003).

La formación de metano involucra dos tipos de microorganismos metanógenos: aquellos que convierten el  $H_2$  y  $CO_2$  a  $CH_4$ , y los que producen  $CH_4$  y  $CO_2$  del acetato (Andersson *et al.*, 2004). Funcionalmente, estos organismos son clasificados en hidrolíticos, productores de ácidos orgánicos, productores de acetato y productores de metano (Iglesias-Vázquez, 2002; Sundh *et al.*, 2003).

En los animales rumiantes se produce metano de manera natural y continua, donde el principal agente biótico que participa a nivel del rumen en la producción de metano son las bacterias anaerobias metanógenas. Estas bacterias utilizan diferentes sustratos para la producción de metano, pero los principales son el  $H_2$  y el  $CO_2$  (Carmona *et al.*, 2005).

Las bacterias que participan en el proceso de producción de biogás son sensibles a ciertos factores, por lo tanto es necesario contar con los conocimientos que permitan precisar su nivel de participación y de control dentro de este proceso (Laichena y Wafula, 1997). Por ejemplo, en un estudio se evaluó la sensibilidad de las bacterias metanógenas a 28 diferentes antibióticos, obteniendo como conclusión que efectivamente, son sensibles a tales sustancias (Wilkie, 2005).

Por el contrario, teniéndose las condiciones más adecuadas, se puede incrementar el crecimiento y actividad de las bacterias metanógenas

proporcionándoles los nutrientes necesarios para su actividad metabólica y mejorar de este modo la estabilización del sistema (Tinajero y Noyola, 2006).

### **Composición general del biogás**

La mayoría de los procesos biológicos anaerobios estabilizan desechos orgánicos que están formados por mezclas de grasas, proteínas y carbohidratos simples. En consecuencia, la composición del biogás estará directamente relacionada con la naturaleza del material orgánico utilizado en el proceso anaerobio (Caine, 2000).

El biogás está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono y es producido durante la degradación anaeróbica de los materiales orgánicos (Andersson *et al.*, 2004). Generalmente, dentro del biogás la concentración de metano es de 60% y la del bióxido de carbono de 40%, conteniendo además *pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua* (Wilkie, 2005). El metano puede variar su concentración de 60-70% y el dióxido de carbono de 30-40% (Laichena y Wafula, 1997).

### **Usos del biogás**

El biogás puede ser usado de la misma manera que los otros gases combustibles, encontrando su mayor aplicación para cocinar y para el alumbrado público (Laichena y Wafula, 1997). Incluso, el biogás se puede combinar con el gas natural, ya que tienen un contenido de energía similar, lo cual permite la mezcla de los dos gases sin reducir el contenido energético, pero para tal fin, sería necesario separar el bióxido de carbono contenido en el biogás (Vinnerås *et al.*, 2006).

La mayoría de los gases producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales y rellenos sanitarios son quemados, pero una parte del gas es usado como fuente para la generación de calor por combustión en calentadores de agua (Bien *et al.*, 2004; Chun *et al.*, 2005). Esta energía también puede ser utilizada

como una alternativa al uso del gas natural mediante su aprovechamiento como combustible en la cocina (Yasui *et al.*, 2005b) o para el alumbrado público en forma directa, mediante lámparas de gas (Felipe-Morales y Moreno, 2005); se puede generar energía mecánica por combustión en máquinas de gas y generar electricidad utilizando máquinas de gas o turbinas (Bien *et al.*, 2004; Wilkie, 2003).

En Suecia se ha planteado la posibilidad de depurar el biogás con la finalidad de adaptarlo a la calidad del gas natural. De esta forma, se podría utilizar en vehículos o introducirlo en la red de abastecimiento (tuberías) de gas natural para su distribución, pero ello ha despertado la preocupación acerca de los probables riesgos de transmitir enfermedades por medio del mismo (Vinnerås *et al.*, 2006), aunque experimentalmente, se ha demostrado que el biogás no representa este riesgo, pues durante la digestión anaerobia se destruyen los microorganismos patógenos por las condiciones propias del proceso (Smith *et al.*, 2005).

### **Bioabonos sólido y líquido generados por digestión anaerobia**

Los fertilizantes sintéticos han sido alabados por ser “ambientalmente inocuos” y por asociarse con el incremento de la producción en muchos países, aunque esta aparente bonanza frecuentemente oculta los costos ambientales, pues cuando los fertilizantes no son usados por el cultivo terminan en el ambiente, principalmente en las aguas superficiales o subterráneas (Altieri y Nicholls, 2006). Ante esta situación, se están desarrollando métodos alternativos para aumentar la producción de los cultivos a partir de residuos orgánicos, los cuales benefician directamente al suelo como base de la producción agrícola.

Los productores de cultivos orgánicos con limitado acceso a fuentes de estiércol dependen fuertemente del uso de abonos verdes para suministrar al suelo el nitrógeno necesario (Svensson *et al.*, 2006). El incremento en el reciclado de elementos nutritivos de los desechos biológicos es importante en el desarrollo de sistemas agropecuarios (Johansson *et al.*, 2005) para el diseño de agroecosistemas sustentables (Altieri y Nicholls, 2006). Para ello es necesario desarrollar tecnologías alternativas, como la descomposición anaerobia de

materiales biológicos mediante un biodigestor, para producir los abonos requeridos por los cultivos.

Además del biogás, en el proceso de digestión anaerobia se obtiene bioabono líquido y compost ricos en elementos nutritivos, los cuales pueden ser una alternativa a los fertilizantes químicos que son producidos usando combustibles fósiles y otros materiales artificiales (Ritchie y Watts, 2005). El compost es un producto que se ha estabilizado, por lo tanto puede ser almacenado o asperjado directamente en los suelos, ya que no posee olor, patógenos, semillas de arvenses, ni favorece la proliferación de moscas (Adler y Sikora, 2005; Hao *et al.*, 2001). Pero el proceso no siempre es efectivo, en diversas investigaciones experimentales se ha demostrado que *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. no son afectadas por temperaturas mesofílicas (30-40 °C), mientras que en condiciones termofílicas (45-60 °C) su inactivación es más rápida (Smith *et al.*, 2005).

La principal bondad del compostaje como método para el manejo de desechos es su capacidad de reciclar los nutrimentos esenciales para las especies vegetales. Por si fuera poco, la concentración de éstos y otros constituyentes se conservan durante el proceso, e incluso pueden incrementarse durante la degradación microbiana, ejemplo el nitrógeno, fósforo y otros elementos (Breitenbeck y Schellinger, 2004). Los subproductos obtenidos por el proceso de digestión anaerobia reducen la necesidad de emplear fertilizantes sintéticos y acondicionadores del suelo, y de este modo se hace más sencillo el proceso de producir orgánicamente (Preston, 2005; Wilkie, 2005).

El abono líquido, llamado biol, es una fuente orgánica de fitoreguladores de crecimiento como las auxinas y giberelinas que promueven la actividad fisiológica y estimulan el desarrollo de las plantas (Gomero-Osorio, 2005).

El bioabono sólido o líquido no posee olores desagradables como el estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida, en las cantidades recomendadas. El bioabono sólido puede secarse y almacenarse para usarlo posteriormente, aunque al deshidratarse

puede haber pérdidas por volatilización de hasta un 60%, sobre todo de nitrógeno (Soria-Fregoso *et al.*, 2001). El sustrato ya digerido y estabilizado puede usarse para el abonado de los cultivos, sin los problemas de contaminación que presentan los residuos sin digerir (Iglesias-Vázquez, 2002).

### **Calidad del bioabono**

La calidad del bioabono se describe por varios factores como la edad, madurez, contenido de nutrimentos, microorganismos indicadores y patógenos, metales pesados y contaminación por plaguicidas, además del origen del sustrato y la tecnología usada para el proceso de ganaración (Ermino y Warman, 2004).

La sanidad del bioabono depende de varios factores que influyen para que en la degradación anaerobia se puedan reducir o eliminar en su totalidad los patógenos presentes en los materiales orgánicos tratados, entre esos factores se incluye la temperatura, el tiempo de retención, la competencia microbiana, el pH y las interacciones químicas (Smith *et al.*, 2005).

En Alemania como en otros países de la Unión Europea, el uso de abonos orgánicos, entre ellos el bioabono, es favorecido debido a que existe la obligación legal de reciclar los desechos biológicos para producir y usar el bioabono a fin de reducir la contaminación ambiental, aunque también regulan la calidad del abono para disminuir los posibles riesgos que éste pudiese representar (Bohnel y Lube, 2000). En Estados Unidos existen normas que regulan el uso y disposición de los estiércoles producidos en explotaciones confinadas de ganado, así como regulaciones en materia de uso y disposición de biosólidos (INIFAP, 2005). En México también existe una normatividad en cuanto a la producción y uso de abonos, se aplica principalmente la Ley General de Salud y las leyes de Sanidad Vegetal y Sanidad Animal (Vásquez-Arroyo y Cabral-Martell, 2001), así como la Norma NOM-004-SEMARNAT-2002, que regula el uso y disposición final de los biosólidos (INIFAP, 2005; Tinajero y Noyola, 2006).

## Usos del bioabono

Resultados de investigaciones recientes han demostrado que el proceso de biodigestión produce mejoras importantes en el valor del estiércol de ganado como fertilizante para los cultivos, como también para las plantas acuáticas o los peces cultivados en estanques (Preston, 2005).

El bioabono sólido o biosol producido en el biodigestor es un excelente abono para los cultivos, el cual se recolecta cada que se hace la descarga del biodigestor (Felipe-Morales y Moreno, 2005). Este abono también puede usarse en actividades forestales, jardinería, viveros y recuperación del suelo en espacios degradados (Iglesias-Vázquez, 2002), pues incrementa la materia orgánica y la actividad de los microorganismos del suelo (INIFAP, 2005).

El abono líquido o biol es otro producto del biodigestor que se puede utilizar en una gran variedad de especies vegetales de ciclo corto o perenne, con aplicaciones dirigidas al follaje, al suelo, a la semilla o a la raíz (Gomero-Osorio, 2005). El biol no sólo es un excelente abono orgánico para los cultivos, también es un valioso activador del crecimiento y la floración de las plantas gracias a su contenido de fitohormonas (Felipe-Morales y Moreno, 2005).

## Comparación entre los sistemas de compostaje aerobio y anaerobio

Se considera que el compostaje aerobio es un proceso que tiene un alto potencial de higienización por el calor generado durante el proceso, sin embargo, algunos patógenos como *Clostridium botulinum* pueden sobrevivir en el suelo ante condiciones ambientales adversas y formar esporas que pueden resistir por décadas a la influencia del clima (Bohnel y Lube, 2000). Por otro lado, se ha demostrado que el compostaje con un proceso aerobio efectivo puede eliminar la bacteria *Escherichia coli* O157:H7 del estiércol al mantenerse la temperatura a 47°C por 72 horas (Hess *et al.*, 2004).

Una desventaja del proceso aerobio es que durante el compostaje, varios gases de efecto invernadero son emitidos, dependiendo de factores como el

contenido de carbono y nitrógeno en el estiércol, pH, aireación, entre otros (Hao *et al.*, 2005). Entre los gases liberados se encuentra el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), resultando en una pérdida de hasta 30% de la materia seca (INIFAP, 2005). Estas pérdidas además de contribuir al incremento del efecto invernadero, reducen el valor agronómico del producto final o compost (Hao *et al.*, 2001).

El tratamiento anaerobio de los desechos biológicos ofrece ventajas sobre los sistemas aerobios en términos de bajos requerimientos de energía, menor producción de sedimentos biológicos y el potencial para recuperar energía en forma de biogás (Olca y Kocasoy, 2004). De hecho, cuando este proceso es desarrollado en condiciones termofílicas, la digestión anaerobia puede sanear el producto orgánico residual debido a las condiciones de calor generado, provocando la eliminación de los patógenos presentes en el sustrato (Smith *et al.*, 2005).

Además, el proceso de digestión anaerobia optimiza la conservación y disponibilidad del nitrógeno en los residuos orgánicos, aumentando su mineralización y evitando la contaminación que se genera por las emisiones de éste a la atmósfera y al agua cuando los desechos biológicos son tratados por procesos anaerobios (Svensson *et al.*, 2006).

El uso del biodigestor también mejora la conservación de otros elementos nutritivos ya que se captan todos los productos y subproductos generados en la degradación; además, los residuos orgánicos resultantes de la biodegradación anaerobia tienen mayor riqueza nutricional que los obtenidos en la descomposición aerobia (Soria-Fregoso *et al.*, 2001).

### **Emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera**

El consumo es el motor de nuestra economía, lo cual ha generado un estilo de vida confortable sin ser un problema como tal, pero el uso y eliminación de materiales si lo es, pues se ha adoptado un método de "útese una vez y tirese

lejos de la sociedad" causando serias consecuencias como la contaminación del aire y la alteración de hábitats silvestres (Ritchie y Watts, 2005).

El aumento de la producción de gases de efecto invernadero de fuentes antropogénicas contribuye en gran medida al calentamiento global, problema ambiental al que se le ha dedicado relativamente poca atención, a pesar de que la mayoría de las actividades económicas, en particular, la quema de combustibles fósiles, incrementa la concentración de estos gases en la atmósfera (Hansen y Sato, 2004; Lempert, 2002). La agricultura y la producción pecuaria intervienen ampliamente en las emisiones antropogénicas de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) a la atmósfera (Carmona *et al.*, 2005).

El segundo gas contribuyente a la fuerza radioactiva del clima, después del bióxido de carbono, es el metano, que es originado a partir de varias fuentes de emisión (Lelieveld *et al.*, 1998).

Como parte de una solución a la emisión de gases a partir del estiércol, éste debería almacenarse hasta que pueda ser distribuido en el suelo y durante su almacenaje debería estar tapado para prevenir la emisión de metano, dióxido de carbono, amoníaco y otros gases peligrosos (Umetsu *et al.*, 2005). En atención a esta situación, varios países están estableciendo medidas para controlar las emisiones de gases a la atmósfera. Así por ejemplo, Israel está evaluando todas sus fuentes de emisión y analizando opciones alternativas para reducir éstas a fin de respetar los acuerdos del Protocolo de Kyoto (Ayalon *et al.*, 2000); Dinamarca, tras un número de acuerdos nacionales e internacionales, se ha comprometido a reducir la emisión de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero (Pedersen, 2000).

### **Fuentes de emisión de gases a la atmósfera**

Las emisiones de gases de efecto invernadero de fuentes antropogénicas han contribuido en los pasados 100 años, a un considerable incremento en la concentración de esos gases en la atmósfera. Desde 1800 las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) se han incrementado alrededor de 30, 145 y 15%, respectivamente (El-Fadel y Massoud,

2001). Estos porcentajes no son lo suficientemente claros, pues muchas empresas frecuentemente proporcionan cifras obsoletas, incompletas o inexactas sobre sus emisiones, en comparación con los datos reales conseguidos en estudios realizados por personas o instituciones que no dependen de dichas empresas (Henry *et al.*, 1997).

Las emisiones de metano del estiércol de la ganadería representan de 5 a 6% del total de las emisiones a escala global, y el  $N_2O$  representa aproximadamente el 7% del total de sus emisiones (Hao *et al.*, 2004). De manera natural los rumiantes son contribuyentes significativos al calentamiento global y deterioro de la capa de ozono, por la liberación de altas cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera, entre ellos, el gas carbónico y el metano. El metano producido se genera principalmente por los procesos fermentativos del alimento que ingresa al rumen. Diversas evidencias muestran que la tasa de emisión de metano por fermentación ruminal, está relacionada con las características físico-químicas de la dieta de los animales, las cuales afectan el nivel de consumo y la frecuencia de alimentación (Carmona *et al.*, 2005).

Las emisiones de metano y óxido nítrico que ocurren durante las prácticas agrícolas, son perjudiciales para el ambiente debido a sus efectos sobre el calentamiento global, los cuales se estima que son 23 y 296 veces más fuertes, respectivamente, que el  $CO_2$  (Svensson *et al.*, 2005).

La energía y el transporte representan un dilema para el desarrollo sustentable, ya que ambos son necesarios para lograr metas socioeconómicas, sin embargo, los sistemas de energía basados en combustibles fósiles están asociados con la degradación ambiental, especialmente con respecto a la contaminación atmosférica y al cambio climático (Gururaja, 2003).

La emisión de óxido nítrico ( $N_2O$ ) y óxido nítrico (NO) a la atmósfera a partir de los fertilizantes nitrogenados tiene un impacto importante a nivel global en el ciclo del nitrógeno, causando daño a la capa de ozono y favoreciendo el problema de calentamiento global (Gliessman, 2002).

## Consecuencias de las emisiones de gases de invernadero

En los últimos cien años han venido cambiando los regímenes de precipitación y temperatura debido a la concentración de gases contaminantes en la atmósfera, ocasionando un cambio en el clima de la Tierra (Araújo y Rahbek, 2006); con esto también se espera que aumente la variabilidad interanual del clima, provocando la ocurrencia de ondas de calor más frecuentemente en varias regiones del mundo (Seneviratne *et al.*, 2006). Como consecuencia de lo anterior, las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera se han incrementado drásticamente a partir de la era industrial en 1750, desde entonces el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ha aumentado en 30%, el metano ( $\text{CH}_4$ ) ha doblado su concentración y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ha crecido en 15% aproximadamente, siendo las actividades humanas las fuentes que más contribuyen a esos aumentos en los niveles de concentración (Ayalon *et al.*, 2000).

El cambio climático global puede traer consecuencias indeseables para los sistemas de producción agropecuaria, además de afectar la biodiversidad del planeta, que si bien las especies podrían tolerar tales cambios, también podrían evolucionar sus poblaciones o cambiar su distribución (Araújo y Rahbek, 2006).

Recientes investigaciones indican que el estiércol de la ganadería contribuye significativamente a las emisiones de metano a nivel global (y por lo tanto, al calentamiento del clima) debido al incremento en las poblaciones de animales en los sistemas intensivos y al uso y manejo del estiércol líquido (Umetsu *et al.*, 2005), como consecuencia, la ganadería junto con la agricultura serán las principales actividades afectadas por el cambio climático en todo el mundo al ser alterada la temperatura y la precipitación (RAC-F, 2005).

Las elevadas concentraciones de los gases de efecto invernadero causan un aumento en la retención de calor atmosférico que se atribuye al hecho de que estos gases actúan como una cubierta que retiene el calor del sol en la atmósfera, creando temperaturas más altas, lo cual ha causado un incremento promedio de la temperatura global entre 0.33 y 0.66 °C (El-Fadel y Massoud, 2001). El mayor

aumento en la temperatura se dio en el siglo pasado produciendo lo que es conocido como cambio climático global de la superficie de la Tierra (RAC-F, 2005).

## **Metano**

El metano es un gas químicamente activo producido por procesos anaerobios (Verburg y Denier Van Der Gon, 2001), es moderadamente radioactivo con una capacidad para cambiar su concentración en la atmósfera en un rango de tiempo de aproximadamente siete años (Lelieveld *et al.*, 1998).

Las concentraciones de metano en la atmósfera son inferiores a las de CO<sub>2</sub>, sin embargo, el primero se está incrementando rápidamente y además posee un efecto 21-30 veces más contaminante con respecto al CO<sub>2</sub>, y por lo tanto, más potente que éste en aumentar el calentamiento global (Carmona *et al.*, 2005). Por su parte, el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> es 200 veces mayor que el aumento del metano en la atmósfera (Lelieveld *et al.*, 1998).

La abundancia del metano en la atmósfera ha sido asociada a fuentes antropogénicas que incluyen la incineración de biomasa, los rellenos sanitarios, las minas de carbón, los sistemas de gas natural, los rumiantes y el almacenaje de sus desechos (McGinn *et al.*, 2006; Umetsu *et al.*, 2005), los lodos de aguas residuales, los desechos domésticos, y otras actividades humanas (González-Avalos y Ruiz-Suárez, 2001).

No menos importantes son las fuentes naturales de emisión global, como se puede observar en la figura 1, los pantanos son la principal fuente de emisión junto con otras que incluyen a los incendios forestales, la deforestación y la incineración de leña y residuos de la agricultura (Lelieveld *et al.*, 1998).

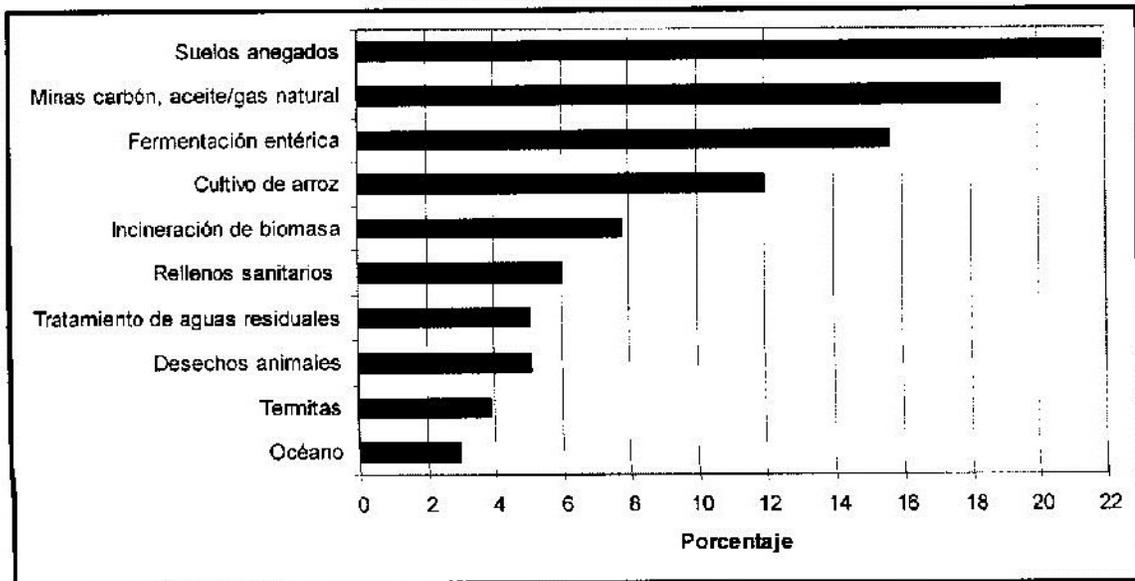


Figura 1. Contribución (%) de diferentes fuentes a la emisión global de metano en 1998 (El-Fadel y Massoud, 2001).

Se estima que la emisión global de metano se aproxima a  $500 \pm 100$  Tg, donde el 70% es de fuentes antropogénicas y el 30% de fuentes naturales. Los países desarrollados contribuyen con sus emisiones por el tratamiento de aguas residuales de la industria en aproximadamente 76%, mientras que la contribución de los países en vías de desarrollo se estima que es cercana a 24% del metano global emitido (El-Fadel y Massoud, 2001).

Un incremento considerable en las emisiones de metano se ha originado como resultado de la rápida expansión de la agricultura y la industrialización. El cultivo de arroz, la quema de biomasa, la ganadería (animales domésticos) y sus desechos, así como el cambio de uso de suelo, son las principales fuentes de emisión de metano en la agricultura. Los rumiantes contribuyen a la emisión de este gas con una cantidad cercana a 85 Tg/año (McGinn *et al.*, 2006). Los microorganismos en la flora estomacal (rumen) de los rumiantes producen metano en grandes cantidades, el cual es liberado por exhalación y eructación, es decir, por fermentación entérica (Lelieveld *et al.*, 1998). Éste contribuye al incremento de la concentración global de ozono ( $O_3$ ) en la troposfera. El metano es un gas contaminante que afecta la salud humana asociándolo en muchos casos con la

mortalidad prematura y es un oxidante que causa daños a la agricultura, los ecosistemas y los materiales, y al igual que el metano es un gas de efecto invernadero (West *et al.*, 2006).

El metano puede ser medido utilizando las técnicas de espectroscopía infrarroja, espectroscopía de masa, técnicas de diodo láser y cromatografía de gases (Carmona *et al.*, 2005). La medición de las emisiones de metano, en el caso de los rumiantes, se estima al confinar los animales en grandes cámaras y colocándoles una máscara o capa en la cabeza, o se puede hacer por técnicas radiométricas que requieren del muestreo del aire respirado por los animales. Las técnicas antes mencionadas no son apropiadas para evaluar las emisiones en granjas de gran escala y la variabilidad entre las granjas que puede ser en parte atribuida a diferentes formas de manejo de la granja (McGinn *et al.*, 2006).

Las desventajas de los métodos de medición no permiten tener datos precisos de las diferentes fuentes de emisión a nivel global. Aunado a ello, los datos de las emisiones industriales reportados por las empresas y los reportes de las agencias encargadas de controlar a éstas, presentan varias inconsistencias de acuerdo a los datos obtenidos en estudios independientes (Henry *et al.*, 1997).

Una técnica más flexible para cuantificar las emisiones emplea como modelo un gas blanco de una fuente determinada, esta técnica conocida como "dispersión inversa" tiene la ventaja de requerir solo la medida de la concentración de un gas y la información básica sobre el viento (McGinn *et al.*, 2006).

Si al aplicar la digestión anaerobia a los desechos orgánicos el biogás fuera capturado y utilizado, se eliminaría la emisión de metano a la atmósfera, y con ello, el efecto invernadero que provoca este gas (Wilkie, 2005). En general, una reducción de 5% en las emisiones de metano de fuentes antropogénicas podría estabilizar los niveles de este gas de efecto invernadero en la atmósfera (Lelieveld *et al.*, 1998).

## **Bióxido de carbono**

El contenido de carbono en la atmósfera terrestre se ha incrementado desde los tiempos preindustriales hasta la actualidad, principalmente en forma de dióxido de carbono (Zimov *et 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 principalmente a las emisiones de este gas a partir de la industria (West y Fiore, 2005).

Para la estabilización de la composición atmosférica se requiere de la reducción en la emisión de bióxido de carbono hasta igualar la cantidad de CO<sub>2</sub> que absorbe el océano y la biosfera (Hansen y Sato, 2004; Lelieveld *et al.*, 1998). Esta mitigación en la emisión de CO<sub>2</sub> traería importantes beneficios para la calidad del aire y la salud pública (West y Fiore, 2005).

El bióxido de carbono liberado al quemar el metano del biogás proviene del carbono en los desechos orgánicos, el cual finalmente procede de la atmósfera y parte de un ciclo cerrado del carbono, por lo tanto no contribuye al incremento de los niveles de CO<sub>2</sub> 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 (Gliessman, 2002). Además, se puede evitar que el dióxido de carbono, componente del biogás, sea liberado a la atmósfera cuando es aprovechado para los vegetales dentro de un invernadero (Mengjie, 2002).

## **Contribución regional a la emisión de gases**

La Comarca Lagunera, situada entre los estados de Coahuila y Durango en la parte norte de México, es la región productora de leche más importante del país. La región Laguna representa el 0.03% del territorio nacional y contiene el 0.2% de

la población de vacas lecheras a nivel nacional, con 425,960 en 2005 (INEGI, 2006).

En esta zona, el deterioro de los recursos hídricos ha empezado a afectar la producción agropecuaria debido principalmente a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, pues la extracción de agua es mayor a la capacidad de recarga (García-Salazar *et al.*, 2006). Por esta razón, la enorme producción de leche y de los cultivos forrajeros en esta zona árida es una paradoja por los problemas ecológicos que atrae, pues representa una amenaza para la disponibilidad de agua en la región y por la emisión de gases de efecto invernadero de la ganadería. Los ríos se han secado debido al riego de los campos agrícolas para la producción de forraje y los niveles del agua subterránea han decrecido dramáticamente desde que inició la intensa producción de cultivos en la región Lagunera. También se presentan problemas de fertilidad y erosión del suelo por las prácticas de monocultivo de algodón, maíz o alfalfa, clima seco y la ausencia de prácticas de conservación de suelos para prevenir la erosión. Por lo anterior, la sustentabilidad de los sistemas de producción agropecuarios en la región es un punto crítico.

La actividad pecuaria en la Comarca Lagunera es una de las más fuertes a nivel nacional. Las estimaciones potenciales de estiércol fresco para La Comarca Lagunera es de 2,311,000 Ton/año.

La ganadería, en especial los rumiantes producen metano de dos maneras: la primera es por fermentación entérica que es producida por la acción de microorganismos anaerobios durante la digestión de los alimentos (Carmona *et al.*, 2005). La segunda forma es resultado de la descomposición anaerobia del estiércol, esto se intensifica cuando una importante población de ganado se mantiene en áreas cerradas y restringidas generando el estiércol líquido (Ruiz-Suárez y González-Avalos, 1997). Si se consideran las cifras mencionadas con anterioridad de ganado bovino y caprino principalmente, se podría afirmar que la ganadería es una de las principales fuentes de emisión de metano a la atmósfera en la Laguna.

Por otro lado, las condiciones climáticas de esta región representan una ventaja para la producción de biogás, ya que las plantas de biogás solo trabajan cuando las temperaturas son superiores a los 15 °C.

### **El biodigestor: ¿una tecnología apropiada para la autosuficiencia?**

Para que un agroecosistema sea sostenible, el flujo de energía dentro de éste puede ser diseñado para depender menos de insumos no renovables, de modo que exista un balance entre la energía que fluye dentro del sistema y la que abandona el sistema en forma de cosecha o de productos (Gliessman, 2002). El grado en que un agroecosistema aumenta su sustentabilidad dependerá básicamente de un manejo agroecológico. El concepto de sustentabilidad es útil porque recoge un conjunto de preocupaciones desde los ámbitos económico, social y ecológico (Altieri y Nicholls, 2006).

La sostenibilidad se define como la condición o capacidad de cosechar a perpetuidad cierta biomasa de un sistema que tiene la capacidad de renovarse por sí mismo o que su renovación no está en riesgo (Gliessman, 2002). El hombre puede favorecer muchos procesos naturales para que lo anterior sea posible. La humanidad tiene la habilidad para hacer "desarrollo sustentable" satisfaciendo sus necesidades ahora y en el futuro (Kates *et al.*, 2005).

En varias ocasiones se ha demostrado que los sistemas de producción de biocombustibles son capaces de reemplazar u ocupar el lugar de los combustibles fósiles tras su carencia en el futuro, así como disminuir las emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el calentamiento global; en sí, estos combustibles de origen biológico frecuentemente son promovidos como una "alternativa verde" a los combustibles fósiles (Ulgiati, 2001). De hecho, los desechos de los animales representan una enorme fuente de energía sustentable, disponible y renovable (Borole *et al.*, 2006).

El biodigestor ofrece muchos beneficios cuando está estrechamente integrado a un sistema agrícola: es una fuente renovable de combustible para cocinar y para la iluminación, con lo cual se reduce la necesidad de usar leña;

convierte al estiércol en un fertilizante de alta calidad que puede usarse para distintos propósitos; mejora las condiciones sanitarias de la granja y reduce la propagación de parásitos y bacterias dañinas del estiércol y de otros subproductos orgánicos; mejora el ambiente al reducir la dependencia de leña, provocando un menor índice de deforestación, y se reduce la emisión de metano a la atmósfera al utilizar el biogás (Preston, 2005; Wilkie, 2003). Por todo lo anterior, la producción de biogás puede ser una importante alternativa como fuente de energía y para el uso eficiente de los productos y los desechos orgánicos (Bien *et al.*, 2004).

La producción de biogás de los materiales de desecho para uso como fuente de energía combustible califica a la digestión anaerobia como una tecnología sustentable para la generación de energía renovable. Muchos de los beneficios del proceso de digestión anaerobia se transforman directamente a beneficios prácticos y económicos que contribuyen a la sustentabilidad a largo plazo (Wilkie, 2005).

Para las áreas pobres del medio rural y urbano las tecnologías de conversión de biomasa a energía y productos, propiamente diseñadas podrían reducir los costos económicos y ambientales de calefacción y cocina, y en algunos casos, brindar oportunidades de crecimiento económico y empleo (Khalil-Makki y Ezeldin-Eljack, 2003).

Diversos investigadores han señalado cada vez más que es posible obtener un balance entre el ambiente, los rendimientos sostenibles y la fertilidad del suelo mediada biológicamente a través del diseño de agroecosistemas que demanden el uso de tecnologías de bajo insumo (Altieri y Nicholls, 2006).

## **CAPÍTULO III.**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **Lugar de realización del experimento**

Este experimento se realizó en la Unidad Agroecológica del Departamento de Agroecología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, durante el periodo comprendido de Marzo a Diciembre de 2006. La ubicación geográfica de esta unidad es 25° 55' latitud norte y 103° 37' longitud oeste, con una altura de 1127 metros sobre el nivel del mar.

#### **Material biológico**

Se utilizaron tres tipos de estiércol (de cabra, bovino y de cerdo) como materia prima para evaluar las diferencias en cuanto a la producción de biogás y la calidad del compost, productos de la digestión anaerobia. Éstos materiales se obtuvieron en establos ubicados en los alrededores de la Universidad. El estiércol bovino se obtuvo de un establo en el que la dieta de los animales consiste principalmente de alfalfa y alimentos concentrados. El estiércol de cabra provino del establo de la Universidad, se encontraba relativamente fresco y mezclado con residuos de alfalfa. Finalmente, el estiércol de cerdo fue proporcionado por el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 1, éste se encontraba con cierto grado de descomposición.

#### **Construcción de los biodigestores**

Las unidades experimentales consistieron de contenedores de plástico de color negro de 200 litros, con tapa y cierre hermético. Estos se colocaron en un área limpia y soleada, pues la temperatura es un factor importante para el buen desempeño del proceso anaerobio (Laichena y Wafula, 1997).

Las unidades experimentales se llenaron hasta alcanzar 2/3 de su capacidad con una mezcla de estiércol y agua en una proporción de 1:1 en relación volumen/volumen. Esta mezcla fue homogenizada por medio de agitación y en seguida fueron cerrados los biodigestores, los cuales no se abrieron, sólo hasta que terminó la producción de biogás. Los cilindros fueron marcados con números del 1 al 12. Los primeros 4 se llenaron con estiércol de cabra, 5-8 con estiércol bovino y 9-12 con estiércol de cerdo.

Para capturar el biogás generado se emplearon cámaras de neumático. Éstas se conectaron a los biodigestores utilizando manguera de látex de 1 pulgada de grosor y 1.5 m de longitud para conducir el gas hacia la cámara.

## **Variables de estudio**

### **Medición del biogás producido**

Se determinó el rendimiento en la producción de biogás pesando las cámaras cada vez que éstas se encontraban llenas, para ello se utilizó una báscula Sartorius<sup>MR</sup> con una precisión de  $\pm 1$  g. También se midió el perímetro de una sección de la cámara y el diámetro de la misma para hacer las determinaciones.

Para calcular el volumen de biogás contenido en cada cámara se utilizó la siguiente fórmula:

$$V_t = (p^2/4\pi) * D\pi$$

Donde:

$V_t$ = volumen total ( $m^3$ )

$p$ = perímetro de una sección de la cámara ( $cm^2$ )

$D$ = diámetro de la cámara ( $cm^2$ )

Después, la masa real del biogás ( $m_b$ ) contenido en la cámara se determinó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}m_b &= m_a + \hat{a} \\m_b &= m_a + V_t \cdot d_a \\m_b &= m_a + [(p^2/4\pi) \cdot D\pi] \cdot d_a\end{aligned}$$

Donde:

$m_a$ = peso aparente del biogás (g)

$\hat{a}$ = Fuerza de Arquímedes (g)

$d_a$ = densidad del aire

Por otro lado, la cantidad de gas contenido dentro de la parte superior de cada biodigestor fue deducido de los datos previos, considerando que la presión dentro de la cámara y el contenedor es la misma. Además, el peso del gas contenido en la parte superior del contenedor ( $m_T$ ) es directamente proporcional a la relación  $m_b/V_t$ . El volumen de esta parte del contenedor es constante y conocido ( $V_T=0.075\text{m}^3$ ), la masa total del biogás producido ( $m_{tot}$ ) se calculó a través de la siguiente relación:

$$\begin{aligned}m_{tot} &= m_b + m_T \\m_{tot} &= m_b + 0.075 \cdot (m_b/V_t)\end{aligned}$$

### **Composición química de la materia prima y del producto terminado**

En el Laboratorio de Suelos de la UAAAN se realizaron las determinaciones para estimar contenidos de nitrógeno, fósforo y carbono orgánico, además de otros parámetros como pH, conductividad eléctrica y materia orgánica. De cada sustrato se tomaron dos muestras, las cuales fueron analizadas antes del proceso de digestión. Al finalizar el experimento, el sustrato fue dividido y analizado en dos fases: la parte sólida y la fase líquida, cuyo manejo fue el mismo que para las muestras anteriores al proceso, pero en este caso fueron analizadas en forma individual, debido a que los dos productos pueden usarse por separado como abonos durante el desarrollo de los cultivos (Gomero-Osorio, 2005).

### **Determinaciones químicas**

Las muestras del estiércol y de bioabono fueron analizadas para: nitrógeno por el método Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1982); el contenido de materia orgánica (M.O.) y contenido de C orgánico se determinaron por ignición de la muestra a 550 °C durante un periodo de 5 h (Nelson y Sommers, 1982).

El carbono orgánico se estima del valor de contenido de MO con 58% de C (Nelson y Sommers, 1982). La concentración teórica del estiércol empleado se calcula por la adición de la concentración de N Kjeldhal con contenido de ( $\text{NO}^{-3} + \text{NO}^{-2}$ )-N. La relación carbono:nitrógeno (C:N) esta basada en la concentración del C orgánico total y N total.

### **Determinaciones microbiológicas**

La determinación de *E. coli* se realizó por el método en placa de Petrifilm™ que contiene los nutrimentos para la determinación del indicador (*E. coli* y conformes totales) y un agente solidificante en frío soluble en agua (Vásquez-Arroyo, 2004). La determinación de *Salmonella* spp. se realizó conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-002-Ecol-1994 por el método del Número Más Probable.

### **Calidad y madurez de la composta.**

Para estas determinaciones se realizaron pruebas de fitotoxicidad mediante un bioensayo de germinación empleando semillas de brócoli, zanahoria y lenteja. Esta prueba de germinación además de expresar la madurez de la composta, puede reflejar la presencia de fitotoxinas en la misma. Índices de germinación mayores a 80% indican la desaparición de fitotoxicidad en la composta (Emino y Waman, 2004).

La toma de muestra para las determinaciones de la calidad y madurez de la composta se realizó de la siguiente manera: se tomaron dos muestras de cada tipo de bioabono. Estas muestras se reunieron en una sola para generar una muestra compuesta. Las mismas muestras se usaron para realizar las diferentes determinaciones (Thiquia, 2005).

El bioensayo consistió de tres tratamientos y cinco repeticiones, usando los tres tipos de bioabono (de cabra, de vaca y de cerdo). Se colocaron diez semillas de brócoli sobre una mezcla de arena y biofertilizante puestos en cajas Petri en una relación de 50:50 (peso/peso), y se comparó con un testigo para el cual solo se utilizó como sustrato una capa de papel filtro húmedo sobre la caja Petri. Esta prueba se repitió también con las semillas de zanahoria y lenteja, obteniendo resultados similares.

También se realizó el bioensayo utilizando una mezcla de vermicomposta y arena a fin de comparar los resultados obtenidos al utilizar el bioabono. El procedimiento, así como el testigo usado, fueron los mismos en ambos ensayos.

### **Temperatura**

Se instaló un termómetro a uno de los biodigestores de cada tratamiento, en los que se registró la lectura tres veces al día: mañana (8:00 AM), tarde (2:00 PM) y noche (8:00 PM) durante todo el periodo de desarrollo del experimento para determinar como se comportaba el proceso de digestión anaerobia bajo la condiciones de temperatura de la región.

### **Diseño experimental**

El diseño experimental fue de bloques al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones (12 biodigestores en total), los tratamientos fueron estiércol bovino, de cabra y de cerdo. Cada unidad experimental consistió de un recipiente de plástico con una capacidad de 200 litros.

### **Análisis de datos**

Los datos fueron analizados estadísticamente mediante un análisis de varianza y un análisis de comparación de medias con la prueba de Tuckey a un nivel de significancia de  $P \leq 0.05$  utilizándose el paquete estadístico de Olivares-Sáenz (1987).

## CAPÍTULO IV.

### RESULTADOS Y DISCUSION

En la actualidad, los desechos orgánicos son procesados ya sea quemándolos o mediante degradación biológica por procesos aerobios o anaerobios. 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. Del presente estudio, se destacan los resultados que a continuación se detallan.

#### 4.1. Análisis de la materia prima

Los resultados de la composición de los estiércoles al tiempo cero (columna izquierda) y al final (columna derecha) del proceso de digestión anaerobia se presentan en el cuadro 2. Como se puede observar, los cambios más significativos se registraron en conductividad eléctrica, materia orgánica y relación C/N. El valor más bajo para la conductividad se presentó en el estiércol de cerdo, mientras que para materia orgánica y relación C/N lo fue para el de bovinos.

Cuadro 2. Composición del estiércol al inicio y de bioabono al final del proceso de digestión anaeróbica bajo condiciones de la Comarca Lagunera.

Tipo de estiércol	pH		CE (mS/cm)		% Mat. orgánica		Nitrógeno total (%)		Carbono orgánico (%)		Relación C/N		Fósforo (%)	
Caprino	8.3	8.6	23.0	14.0	55.5	58.9	2.05	2.94	32.2	34.21	16:1	11:1	0.26	0.23
Bovino	8.4	8.5	19.1	11.6	53.4	54.6	2.29	2.73	31.0	31.65	16:1	11:1	0.25	0.23
Porcino	6.5	6.8	29.4	11.2	56.0	56.8	4.92	2.84	32.5	32.95	6:1	11:1	1.15	0.81

#### 4.2. Calidad sanitaria de los subproductos pecuarios

Los resultados del análisis microbiológico fueron negativos tanto para *Escherichia coli*, como para *Salmonella* spp. De hecho, (Callaway *et al.*, 2004) mencionan que la bacteria *Escherichia coli* O157:H7 se encuentra en proporciones

relativamente bajas (1.25 y 2.25%) en ganado bovino y en cerdos, respectivamente, en estudios realizados en el Centro de México.

#### 4.3. Producción de biogás

El periodo de medición del biogás producido se extendió del 3 de abril al 21 de mayo de 2006. La producción se estimó en litros de gas por día.

Es probable que se hayan realizado subestimaciones en la cuantificación del biogás por la influencia de la temperatura y posibles fugas que no fue posible controlar.

Las estimaciones reflejaron que el tratamiento con estiércol de bovino generó 3.7 m<sup>3</sup> de biogás con un tiempo de retención de 60 días, el estiércol de cabra 3.2 m<sup>3</sup> y el de cerdo 3.0 m<sup>3</sup>, como se muestra en la figura 2, sin embargo, no se encontró diferencia estadística significativa entre la producción del biogás en los tres tipos de estiércol, por lo tanto, la hipótesis de investigación (H<sub>1</sub>) se rechaza al no haber variación entre los distintos sustratos.

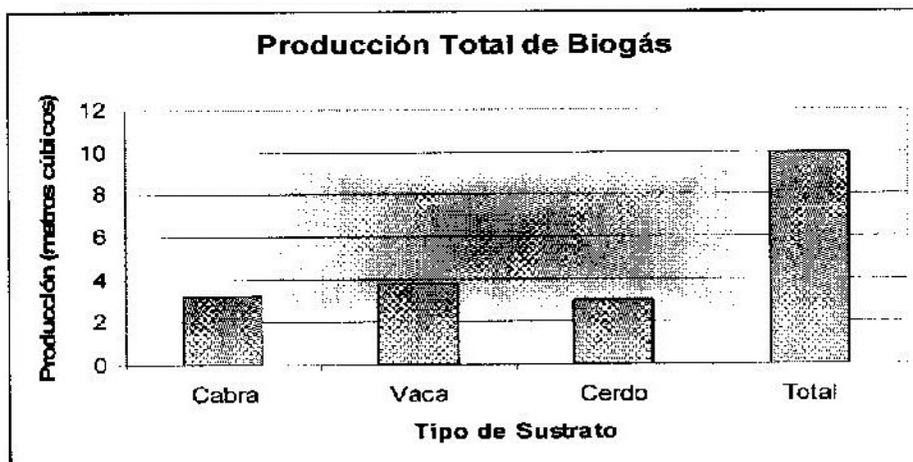


Figura 2. Producción total de biogás de cada tipo de estiércol.

Respecto a la producción de biogás con diferentes tipos de estiércol, los resultados encontrados en la literatura son contradictorios. Por un lado, el ISAT (1999) presenta un reporte global sobre biogás asumiendo que la producción

diaria de éste en regiones tropicales es de alrededor de 40 litros por kilogramo de estiércol bovino y de 60 para los desechos de cerdo. En nuestro caso, tomando en cuenta que se llenaron los contenedores marcados del 5-8 con 57 kg de estiércol bovino y del 9-12 con 81 kg de estiércol de cerdo, solamente se obtuvo una producción diaria de 2.1 litros para el estiércol bovino y de 1.2 para el estiércol de cerdos. De acuerdo a los datos anteriores, los resultados que presenta el ISAT son 40 y 60 veces más altos que los obtenidos.

Por otro lado, Borole *et al.* (2006) presenta en sus resultados de investigación sobre producción de biogás a partir de estiércol de bovinos en digestores de 100 litros, uno con sistema de mezclado y otro sin mezcla. Éste expresa sus resultados en litros de biogás por litro de solución (mezcla del estiércol con agua), obteniéndose 0.64 en condiciones de mezclado y 0.30 en el sistema sin mezcla. En el presente experimento, todos los contenedores se llenaron con 133 litros de solución, y se obtuvo en el caso del estiércol de bovino 0.8 litros, lo cual es tres veces más que el resultado de Borole *et al.* en condiciones normales y mayor que el resultado bajo condiciones de mezclado.

Otro experimento realizado en Palampur, India, el cual consistió de dos plantas de biogás con 1 y 2 m<sup>3</sup> de dimensión, bajo condiciones de temperatura ambiente. Éstas se alimentaron con 22 kg de estiércol bovino por cada m<sup>3</sup> de capacidad durante los diferentes meses del año (Kalia y Singh, 2004). Éstos autores demostraron que la temperatura es un factor determinante en la producción de biogás, obteniendo la más baja producción en febrero (0.7 L de gas kg<sup>-1</sup> de estiércol) a una temperatura media de 13.7 °C, y la producción más alta en junio (1.3 L de gas kg<sup>-1</sup> de estiércol) a 23.5 °C. Comparando estas cifras con la producción de biogás a partir de estiércol bovino, se observa que casi se duplicó la cantidad de biogás producido en junio y se triplicó la cantidad generada para el mes de febrero. Lo anterior puede explicarse al considerar que la temperatura media durante la realización del experimento fue más alta (32 °C) que las reportadas por estos autores en los diferentes meses del año y que existe una correlación positiva respecto de la producción de biogás y la temperatura.

Según un estudio de caso presentado por Laichena y Wafula (1997), una familia típica (8 personas) del área rural en Kenya requiere de un total de 3,856 litros diarios de biogás para cubrir sus necesidades de cocina e iluminación. De acuerdo a los resultados de la producción obtenida en este experimento, se requeriría establecer 32 biodigestores en lote bajo condiciones anaerobias para producir esa cantidad de biogás requerida por la familia. Se podría incrementar la eficiencia del proceso de producción mediante la mejora del sistema de colecta de biogás y hermetismo del sistema, a fin de reducir el número de biodigestores requeridos para producir la cantidad de biogás precisada por esta familia, así como mejorar la relación C/N mediante mezclas de diferentes sustratos.

#### 4.4. Análisis del bioabono

Los resultados obtenidos al analizar las muestras de bioabono sólido se presentan en el cuadro 2 a fin de compararlos con los valores de los mismos parámetros en el estiércol.

Debido a que la parte líquida del sustrato, que se obtiene del proceso de descomposición se puede utilizar individualmente como fertilizante foliar (Gomero-Osorio, 2005), ésta fue analizada al igual que el bioabono sólido. En el cuadro 3 se presentan los resultados de los análisis, destacándose nuevamente para la mayoría de los parámetros el bioabono proveniente del estiércol de cerdo.

Cuadro 3. Valores de los parámetros medidos en el bioabono líquido.

Tipo de bioabono	pH	CE (mS/cm)	% Mat. orgánica	Nitrógeno total (%)	Carbono orgánico (%)	Relación C/N	Fósforo (%)
Caprino	7.9	47.9	2.6	0.13	1.55	12:1	0.008
Bovino	7.8	42.4	1.6	0.08	0.93	11:1	0.011
Porcino	6.3	54.3	8.2	0.40	4.73	12:1	0.143

En un análisis de bioabono líquido obtenido de estiércol de vacunos Gomero-Osorio (2005) reportó un contenido de 1.6% de nitrógeno y 0.2% de

fósforo. Esto significa que los valores obtenidos en este estudio están muy por debajo de los valores reportados por este autor.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el bioensayo, todos los sustratos utilizados para la germinación mostraron toxicidad en la proporción utilizada de 50:50 de arena-sustrato con todas las semillas empleadas. En todos los casos se obtuvo nula germinación, incluyendo la vermicomposta, en la cual solamente con la semilla de brócoli hubo buenos resultados, obteniendo un índice de germinación de 84%. Estos resultados no se pueden atribuir al estado de la semilla, pues el testigo reportó 93% de germinación para el brócoli, 90% en zanahoria y 96% para lenteja. Estos resultados se deben probablemente a un estado de inmadurez de los diferentes sustratos o a la presencia de elementos fitotóxicos como metales pesados en los mismos, entre otras posibles causas de la toxicidad del bioabono.

#### **4.5. Calidad sanitaria del bioabono**

Los análisis microbiológicos generaron resultados negativos, tanto para *Escherichia coli* como para *Salmonella* spp.

En el experimento se presentaron fallas y errores, por ejemplo la falta de equipos de precisión para cuantificar el biogás generado y la carencia de materiales apropiados para hermetizar el sistema. Éstos y otros problemas pudieron influir en los resultados. Sin embargo, esto se puede justificar si consideramos que es el primer ensayo de investigación sobre producción de biogás a nivel regional. Además, la literatura internacional generalmente presenta procedimientos y resultados utilizando diseños modernos y plantas a gran escala, lo cual resulta de poca utilidad para resolver dudas al momento de planear y operar plantas de biogás de para su aplicación en áreas marginadas.

La falta de financiamiento suficiente fue otro impedimento para realizar todas las actividades planeadas y comprar los materiales apropiados para lograr mejores resultados; por esta y otras razones no fue posible llevar a cabo los análisis sobre metales pesados en el estiércol y en el producto digerido, tampoco

fue posible realizar la determinación por cromatografía de gases de la composición porcentual del biogás.

Algunas recomendaciones para mejorar el sistema en posteriores investigaciones serían: comparar el proceso empleando diferentes sustratos; agregar inculo para acelerar la descomposición inicial; usar estiércol fresco; incluir un mecanismo de mezclado y adoptar sistemas más precisos para cuantificar la producción del biogás. Es preciso desarrollar un análisis económico del biodigestor para conocer los costos del sistema, así como los beneficios que se obtienen al utilizar el biogás y revalorizar los materiales orgánicos de desecho, y demostrar de este modo si se puede adoptar en el medio rural.

## CAPITULO V.

### CONCLUSIONES

1. La calidad sanitaria del bioabono fue adecuada desde el punto de vista microbiológico por la ausencia de *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. Sin embargo, el bioensayo mostró una alta toxicidad para la germinación de las semillas en una proporción de 50:50 arena-bioabono.

2. No se encontró diferencia estadística significativa en la producción de biogas a partir de diferentes tipos de estiércol bajo las condiciones de la Comarca Lagunera.

## LITERATURA CITADA

- Adler, P. R., and L. J. Sikora. 2005. Mesophilic composting of arctic char manure. *Compost Sci. Util.* 13: 34-42.
- Altieri, M. A., and C. I. Nicholls. 2006. *Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable*. 2 ed. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Andersson, F. A. T., A. Karlsson, B. H. Svensson, and J. Ejlertsson. 2004. Occurrence and abatement of volatile sulfur compounds during biogas production. *J. Air Waste Man. Assoc.* 54: 855-861.
- Angelidaki, I., X. Chen, J. Cui, P. Kaparaju, and L. Ellegaard. 2006. Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactor. *Water Research* 40: 2621-2628.
- Araújo, M. B., and C. Rahbek. 2006. How does climate change affect biodiversity? *Science* 313: 1396-1397.
- Ayalon, O., Y. Avnimelech, and M. Shechter. 2000. Alternative MSW treatment options to reduce global greenhouse gases emissions - the Israeli example. *Waste Manage Res.* 18: 538-544.
- Bien, J. B., G. Malina, J. D. Bien, and L. Wolny. 2004. Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation. *J. Env. Sci. Health A39*: 939-949.
- Bohnel, H., and K. Lube. 2000. *Clostridium botulinum* and bio-compost. A contribution to the analysis of potential health hazards caused by bio-waste recycling. *J. Vet. Med.* 47: 785-795.
- Borole, A. P., K. T. Klasson, W. Ridenour, J. Holland, K. Karim, M. H. Al-Dahhan. 2006. Methane production in a 100-L upflow bioreactor by anaerobic digestion of farm waste. *Appl. Biochem. Biotech.* 129-132: 887-896.
- Breitenbeck, G. A., and D. Schellinger. 2004. Calculating the reduction in material mass and volume during composting. *Compost Sci. Util.* 12: 365-371.
- Bremner, J. M., and C. S. Mulvaney. 1982. Total nitrogen. In: A. L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. p 595-624. ASA-SSSA, Madison, Wis., USA.
- Caine, M. 2000. Biogas flares: State of the art and market review. IEA Bioenergy, Oxfordshire, UK. URL: [http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/Flaring\\_4-4.PDF](http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/Dokumente/Flaring_4-4.PDF). Fecha de recuperación: Noviembre de 2006.
- Callaway, T. R., R. C. Anderson, G. Tellez, C. Rosario, G. M. Nava, C. Eslava, M. A. Blanco, M. A. Quiroz, A. Olguín, M. Herradora, T. S. Edrington, K. J. Genovese, R. B. Harvey y D. J. Nisbet. 2004. Prevalence of *escherichia coli* 0157 in cattle and swine in central Mexico. *J. Food Protection* 67: 2274-2276.
- 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.
- Chun, Y. N., S. W. Kim, H. O. Song, and J. O. Chae. 2005. SynGas production from organic waste using non-thermal-pulsed discharge. *J. Air Waste Man. Assoc.* 55: 430-436.

- El-Fadel, M., and M. Massoud. 2001. Methane emissions from wastewater management. *Environ. Poll.* 114: 177-185.
- El Siglo de Torreón. 2006. Resumen económico de la Comarca Lagunera 2005. Suplemento especial. p 34-36, Torreón, Coah., México.
- Emino, E. R., and P. R. Warman. 2004. Biological assay for compost quality. *Compost Sci. Util.* 12: 342-348.
- Felipe-Morales, C., and U. Moreno. 2005. Producción de biogás con estiércol de cuy. *LEISA Rev. Agroecol.* 21: 23-24.
- García-Salazar, J. A., E. Guzmán-Soria, and M. Fortis-Hernández. 2006. Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40: 269-276.
- Gliessman, S. R. 2002. *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Turrialba, Costa Rica.
- Goel, R., T. Tokutomi, H. Yasui, and T. Noike. 2003. Optimal process configuration for anaerobic digestion with ozonation. *Water Sci. Tech.* 48: 85-96.
- Goldstein, J. 2004. Making a reality of biogas potential BioCycle. p 45-46.
- Gomero-Osorio, L. 2005. Los biodigestores campesinos una innovación para el aprovechamiento de los recursos orgánicos. *LEISA Rev. Agroecol.* 21: 25-27.
- González-Avalos, E., and L. G. Ruiz-Suárez. 2001. Methane emission factors from cattle manure in Mexico. *Bior. Tech.* 80: 63-71.
- Gururaja, J. 2003. Energy for sustainable development: Review of national and international energy policies. *Nat. Res. Forum* 27: 53-67.
- Hansen, J., and M. Sato. 2004. Greenhouse gas growth rates. *PNAS* 101: 16109-16114.
- Hao, X., C. Chang, and F. J. Larney. 2004. Carbon, nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting. *J. Environ. Qual.* 33: 37-44.
- Hao, X., C. Chang, F. J. Larney, and G. R. Travis. 2001. Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting. *J. Environ. Qual.* 30: 376-386.
- Hao, X., F. J. Larney, Ch. Chang, G. R. Travis, C. K. Nichol, E. Bremer. 2005. The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting. *J. Environ. Qual.* 34: 774-781.
- Henry, R. C., C. H. Spiegelman, J. F. Collins, and E. Park. 1997. Reported emissions of organic gases are not consistent with observations. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 94: 6596-6599.
- Hess, T. F., I. Grdzlishvili, H. Sheng, and C. J. Hovde. 2004. Heat inactivation of *e. Coli* during manure composting. *Compost Sci. Util.* 12: 314-322.
- Iglesias-Vázquez, C. 2002. Programa piloto de gestión de residuos valorizables en Galicia. In: C. d. P. A. e. D. Rural (ed.) *Libro blanco de la agricultura y el desarrollo rural*. p 1-9. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, Galicia, España. URL: [http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/galicia/comunicaciones/cesar\\_iglesias.pdf](http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/galicia/comunicaciones/cesar_iglesias.pdf). Fecha de recuperación: Agosto de 2006.
- INEGI. 2006. Anuario estadístico de México. URL: [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx). Fecha de recuperación: Marzo de 2006.
- INIFAP. 2005. *Uso sustentable de desechos orgánicos en sistemas de producción agrícola*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, México.
- ISAT. 1999. *Biogas digest (volume I. Biogas basics; volume II. Application and product development)*. Information and Advisory Service on Appropriate Technology,

- Eschborn, Germany. URL: <http://www.gtz.de/de/dokumente/en-biogas-volum1.pdf>. Fecha de recuperación: Diciembre de 2006.
- Johansson, M., E. Emmoth, A. C. Salomonsson, and A. Albihn. 2005. Potential risks when spreading anaerobic digestion residues on grass silage crops – survival of bacteria, moulds and viruses. *Grass Forage Sci.* 60: 175-185.
- Kalia, A. K., and S. P. Singh. 2004. Development of a biogas plant. *Ener. Sour.* 26: 707-714.
- Kates, R. W., T. M. Parris, and A. A. Leiserowitz. 2005. What is sustainable development? *Environment* 47: 8-21.
- Khalil-Makki, E., and B. Ezeldin-Eljack. 2003. Seasonal variation and production of biogas from three types of animal dung. *Ahfad Journal* 20: 18-25.
- Laichena, J. K., and J. C. Wafula (Editors). 1997. Biogas technology for rural households in Kenya. Organization of the petroleum exporting countries. *OPEC Rev.* 223-244 pp.
- Lelieveld, J., P. J. Crutzen, and F. J. Dentener. 1998. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus* 50B: 128-150.
- Lempert, R. J. 2002. A new decision sciences for complex systems. *PNAS* 99: 7309-7313.
- McGinn, S. M., T. K. Flesch, L. A. Harper, and K. A. Beauchemin. 2006. An approach for measuring methane emissions from whole farms. *J. Environ. Qual.* 35: 14-20.
- Mengjie, W. 2002. Biogas technology and ecological environment development in rural areas of China. URL: [http://www.ecosanres.org/pdf\\_files/Nanning\\_PDFs/Eng/Wang%20Mengjie%2012\\_C19.pdf](http://www.ecosanres.org/pdf_files/Nanning_PDFs/Eng/Wang%20Mengjie%2012_C19.pdf). Fecha de recuperación: Noviembre de 2006.
- Nelson, D. W., and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A. L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* p 539-579. ASA-SSSA, Madison, Wis., USA.
- Olçay, O., and G. Kocasoy. 2004. Acceleration of the decomposition rate of anaerobic biological treatment. *J. Env. Sci. Health A39:* 1083-1093.
- Olivares-Sáenz, S. 1987. Diseños experimentales. Paquete estadístico. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, N.L., México.
- Park, C., C. Lee, S. Kim, Y. Chen, and H. A. Chase. 2005. Upgrading of anaerobic digestion by incorporating two different hydrolysis processes. *J. Biosci. Bioeng.* 100: 164-167.
- Pedersen, S. L. 2000. The danish co<sub>2</sub> emissions trading system. *RECIEL* 9: 223-231.
- Preston, T. R. 2005. Los biodigestores en los sistemas agrícolas ecológicos. *LEISA Rev. Agroecol.* 21: 18-22.
- RAC-F. 2005. Agriculture, effet de serre et changements climatiques en France, Réseau Action Climat-France, Montreuil, France.
- Ramón, J. A., W. Gastelbondo, and J. C. Bedoya. 2006. Diseño de la automatización de una planta generadora de biogás. *Rev. Colombiana Tecn. Avanzada* 2: 48-54.
- Resch, C., M. Grasmug, W. Smeets, R. Braun, and R. Kirchmayr. 2006. Optimised anaerobic treatment of house-sorted biodegradable waste and slaughterhouse waste in a high loaded half technical scale digester. *Water Sci. Tech.* 53: 213-221.
- Ritchie, A., and B. Watts. 2005. Why we should step on the gas. *Building Design* No. 18-19. p 31.

- Rodríguez, J., G. Ruiz, F. Molina, E. Roca, and J. M. Lema. 2006. A hydrogen-based variable-gain controller for anaerobic digestion processes. *Water Sci. Tech.* 54: 57-62.
- Ruiz-Suárez, L. G., and E. González-Avalos. 1997. Modeling methane emissions from cattle in Mexico. *Sci. Total Environ.* 206: 177-186.
- Seneviratne, S. I., D. Lüthi, M. Litschi, and C. Schär. 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443: 205-209.
- Smith, S. R., N. L. Lang, K. H. M. Cheung, and K. Spanoudaki. 2005. Factors controlling pathogen destruction during anaerobic digestion of biowastes. *Waste Manage.* 25: 417-425.
- Soria-Fregoso, M. J., R. Ferrera-Cerrato, J. Etchevers-Barra, G. Alcántar-González, J. Trinidad-Santos, L. Borges-Gómez y G. Pereyda-Pérez. 2001. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra* 19: 353-362.
- Sundh, I., H. Carlsson, Å. Nordberg, M. Hansson, and B. Mathisen. 2003. Effects of glucose overloading on microbial community structure and biogas production in a laboratory-scale anaerobic digester. *Bior. Tech.* 89: 237-243.
- Svensson, L. M., K. Christensson, and L. Björnsson. 2005. Biogas production from crop residues on a farm-scale level: Is it economically feasible under conditions in Sweden? *Bioprocess Bios. Eng.* 28: 139-148.
- Svensson, L. M., K. Christensson, and L. Björnsson. 2006. Biogas production from crop residues on a farm-scale level: Scale, choice of substrate and utilisation rate most important parameters for financial feasibility. *Bioprocess Bios. Eng.* 29: 137-142.
- Thiquia, S. M. 2005. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. *J. Appl. Microbiol.* 99: 816-828.
- Tinajero, A., and A. Noyola. 2006. Increasing microbial activity in thermophilic anaerobic digestion of physicochemical sludge. *Water Sci. Tech.* 54: 245-251.
- Ulgiate, S. 2001. A comprehensive energy and economic assessment of biofuels: When "green" is not enough. *Crit. Rev. Plant Sci.* 20: 71-106.
- Umetsu, K., Y. Kimura, J. Takahashi, T. Kishimoto, T. Kojima, B. Young. 2005. Methane emission from stored dairy manure slurry and slurry after digestion by methane digester. *An. Sci. Jour.* 76: 73-79.
- Vásquez-Arroyo, J. 2004. *Microbiología sanitaria, México.*
- Vásquez-Arroyo, J., and A. Cabral-Martell. 2001. La inocuidad alimentaria, realidad y reto mundial. *Food, Nutr. Agric.* 28: 4-15.
- 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.
- Vinnerås, B., C. Schönning, and A. Nordin. 2006. Identification of the microbiological community in biogas systems and evaluation of microbial risks from gas usage. *Sci. Total Environ.* 367: 606-615.
- West, J. J., and A. M. Fiore. 2005. Management of tropospheric ozone by reducing methane emissions. *Env. Sci. Tech.* 39: 4685-4691.
- West, J. J., A. M. Fiore, L. W. Horowitz, and D. L. Mauzerall. 2006. Global health benefits of mitigating ozone pollution with methane emission controls. *PNAS* 103: 3988-3993.
- 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. p 63-72.
- Yasui, H., K. Komatsu, R. Goel, Y. Y. Li, and T. Noike. 2005a. Full-scale application of anaerobic digestion process with partial ozonation of digested sludge. *Water Sci. Tech.* 52: 245-252.
- Yasui, H., K. Komatsu, R. Goel, R. Matsubishi, A. Ohashi, H. Harada. 2005b. Minimization of greenhouse gas emission by application of anaerobic digestion process with biogas utilization. *Water Sci. Tech.* 52: 545-552.
- Zimov, S. A., E. A. G. Schuur, and F. S. Chapin III. 2006. Permafrost and the global carbon budget. *Science* 312: 1612-1613.

## GLOSARIO

**Abonos orgánicos.** Sustancias o mezclas de productos en descomposición, de origen natural o sin descomponerse que se incorporan al suelo para aumentar la fertilidad de éste y contribuir al reestablecimiento de su estructura.

**Abonos verdes.** Consiste en enterrar al suelo biomasa verde (fresca) de algunos cultivos, para que después de un proceso de descomposición se convierta en un aporte de materia orgánica para el suelo, y es una fuente importante de nutrientes para las plantas.

**Acetogénesis.** Etapa básica del proceso anaerobio en la cual los productos de la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y gas carbónico.

**Acidogénesis.** Etapa básica del proceso anaerobio en la cual las moléculas pequeñas, producto de la hidrólisis, se transforman en hidrógeno, gas carbónico y ácidos orgánicos (butírico, propiónico y acético).

**Agroecología.** Es la aplicación de conceptos y principios ecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles. La agroecología es una propuesta integral de manejo de recursos naturales que integra varias disciplinas del conocimiento.

**Agroecosistema.** Es todo aquel sistema donde interviene el hombre en al menos uno de sus componentes objetivo. Se trata de un ecosistema sensiblemente modificado y cuya estabilidad generalmente depende de subsidios energéticos.

**Aguas residuales.** También llamadas aguas negras, son las que se producen como resultado de actividades industriales, agrícolas o urbanas y que portan sustancias o materiales indeseables de muy distinta naturaleza, como compuestos orgánicos, metales y microorganismos, según su origen.

**Ambiente.** El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados.

**Antibióticos.** Sustancias producidas generalmente por microorganismos que inhiben el crecimiento de otros microorganismos o que producen su muerte. Caso especial de antagonismo en el que una especie produce una sustancia nociva para otros organismos.

**Arvenses.** Plantas que crecen en los sembradíos y que compiten con el cultivo establecido. Son planta que está creciendo en un suelo alterado.

**Atmósfera.** Es la gran capa gaseosa que rodea al cuerpo terráqueo u otro cuerpo celeste. Su espesor es variable según la latitud, de 600 a 1.500 km. El aire no contaminado de la atmósfera está compuesto por 78% de nitrógeno, 19% de oxígeno y 2% de vapor de agua.

**Autodependencia.** Es una forma de interdependencia equitativa que fomenta la participación en las decisiones, la creatividad social, la autonomía familiar y política, la justa distribución de la riqueza y la tolerancia frente a la diversidad de opiniones.

**Bioabono.** En general, se llama bioabono a un compuesto natural obtenido por el trabajo de organismos de diferente tipo y cuya acción sobre el suelo estimula la nutrición de muchos organismos y aporta nutrientes útiles para ellos.

**Biocombustible.** Término empleado para designar a los combustibles líquidos o gaseosos producidos por conversión de biomasa, entre los que se incluye el biodiesel, el etanol y el biogás.

**Biodegradables.** Sustancias que pueden ser descompuestas por microorganismos (principalmente bacterias aerobias o anaerobias) en un período de tiempo relativamente corto.

**Biodigestor.** Se define como un depósito cerrado herméticamente en el que se fermenta materia orgánica mediante una serie de reacciones biológicas llevadas a cabo por microorganismos o enzimas que se encuentran dentro del mismo.

**Biodiversidad.** Se entiende como la variabilidad de los organismos vivos de cualquier fuente, y la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y los complejos ecológicos que forman parte.

**Biogás.** Gas producido en el proceso de fermentación de materiales orgánicos, en general contiene un alto contenido de metano, una tecnología alternativa de bajo costo que es susceptible de ser usada con fines de generación de energía eléctrica o de uso domiciliario.

**Biomasa.** Es la totalidad de sustancias orgánicas de seres vivos, animales y plantas: elementos de la agricultura y silvicultura, del jardín y de la cocina, así como excremento de personas y animales. La biomasa se puede utilizar como materia prima renovable y como energía material.

**Biosólidos.** Productos originados en la transformación de lodos orgánicos a través de tratamientos destinados a reducir su nivel de patogenicidad, su poder de fermentación y su capacidad de atracción de vectores y a otorgarles aptitud para su utilización agrícola y para la recuperación de suelos y sitios degradados.

**Calentamiento global:** Es la alteración (aumento) de la temperatura del planeta, producto de la intensa actividad humana en los últimos 100 años. El incremento de la temperatura puede modificar la composición de los pisos térmicos, alterar las estaciones de lluvia y aumentar el nivel del mar.

**Cambio climático.** Fenómeno ambiental cuyo efecto principal es el calentamiento de la superficie terrestre y sus causas se relacionan con actividades humanas que están alterando la composición de la atmósfera al aumentar la concentración de los gases que producen el efecto invernadero.

**Chiquero.** Conjunto de instalaciones de diversos materiales donde se concentran los animales en las explotaciones de porcinos.

**Combustibles fósiles.** Fuentes de energía por medio de la combustión que procede de materia que fue orgánica en tiempos antiguos, como el petróleo, el carbón y el gas natural. Su utilización no es ecológica porque se trata de recursos finitos que producen gases contaminantes y contribuyen al efecto invernadero, causa de que la Tierra está aumentando su temperatura media.

**Compost.** Producto resultante del proceso de destrucción y consumo por parte de los microorganismos y organismos descomponedores, de los almidones, proteínas y grasas contenidas en la materia orgánica, para transformarla en abono.

**Contaminación ambiental.** Agregado de materiales y energías residuales al entorno que provocan directa o indirectamente una pérdida reversible o irreversible de la condición normal de los ecosistemas y de sus componentes en general, traducida en consecuencias sanitarias, estéticas, recreacionales, económicas y ecológicas negativas e indeseables.

**Cromatografía de gases.** Es una técnica fisico-química de separación que separa los componentes individuales de una mezcla de gases para su posterior detección.

**Deforestación.** Acción de talar y retirar árboles de un área forestal o boscosa, sin hacer después una adecuada replantación.

**Degradación biológica.** Proceso de descomposición de un producto o una sustancia por acción de organismos vivientes sobre el suelo, aire, cuerpos de agua receptor procesos de tratamiento de aguas residuales.

**Desarrollo sustentable.** Formas de crecimiento económico y actividades que no agotan o degradan recursos naturales de los que depende el crecimiento económico actual y futuro. Representa un modelo de crecimiento económico global que satisface las necesidades actuales de la humanidad, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras, para satisfacer sus propias necesidades.

**Desechos orgánicos.** Cualquier materia residual líquido, sólido o gaseoso proveniente de plantas o animales que es descargada, emitida, depositada, enterrada o diluída en volúmenes tales que puedan, tarde o temprano, producir alteraciones en el ambiente.

**Desertificación.** Proceso de transformación de una zona antes floreciente en diversas formas de vida, hacia una en la que éstas han desaparecido o son escasas; entre sus causas se cuentan la deforestación, el sobrepastoreo, los incendios, la contaminación o la sobreexplotación. Puede deberse a procesos naturales o antropogénicos.

**Digestión anaerobia.** Uso de residuos orgánicos como sustrato para el crecimiento de las bacterias que operan en ausencia de oxígeno, con el fin de estabilizar residuos y reducir su volumen. Las bacterias consumen el carbono presente en los residuos empleándolo como fuente de energía y lo convierten en productos gaseosos, principalmente a metano y dióxido de carbono, con un fango restante que estará formado por compuestos inorgánicos, material orgánico no digerido y agua.

**Energía renovable.** También llamada energía alternativa, es energía con nulo o escaso impacto ambiental que poseen condiciones cíclicas de renovación, como por ejemplo la energía solar, eólica, la fuerza hidráulica y la energía producida a partir de la biomasa.

**Energías alternativas.** Se considera energías alternativas a las que pueden sustituir a la energía convencional y que no implican impactos negativos significativos. Véase también energía renovable.

**Estiércol.** Materia orgánica de origen animal, compuesta en general por vegetales en proceso de descomposición. El estiércol puede incluir los restos de camas y otros materiales orgánicos absorbentes.

**Fermentación anaerobia.** Degradación biológica de compuestos orgánicos a compuestos más sencillos, en condiciones anaerobias. Véase también digestión anaerobia.

**Fermentación entérica.** Conversión enzimática anaerobia de compuestos orgánicos, principalmente carbohidratos, en compuestos más simples, especialmente ácido láctico o alcohol etílico, produciendo energía en forma de ATP.

**Fertilizantes sintéticos.** Fertilizantes inorgánicos que se utilizan para suministrar minerales a un suelo deficiente o para reponer las sustancias que las plantas extraen del mismo. Estos incluyen uno o varios de los elementos fundamentales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio.

**Fitohormonas.** Sustancias químicas, naturales o sintéticas, que intervienen en el desarrollo de las plantas, promoviendo o inhibiendo determinados procesos de su desarrollo. Entre estas hormonas se cuentan las auxinas, giberelinas o las inhibinas.

**Fuentes antropogénicas de emisión.** Son procesos o mecanismos que involucran la intervención del hombre mediante alguna actividad que libera algún gas de efecto invernadero a la atmósfera.

**Gases de efecto invernadero.** Gases que están presentes en la atmósfera y producen el efecto invernadero o calentamiento global, algunos de ellos, en forma natural.

**Gas natural.** Mezcla gaseosa de hidrocarburos cuyo componente principal es el metano ( $\text{CH}_4$ ). Se forma en el interior de la Tierra, en cuencas sedimentarias donde puede presentarse asociado al petróleo.

**Hidrólisis.** Es un proceso mediante el cual se rompen los enlaces moleculares de los residuos agregando reactivos que pueden ser ácidos, bases o enzimas.

**Holístico.** Teoría filosófica según la cual los factores determinantes en la naturaleza son totales y no pueden reducirse a la suma de sus partes. La perspectiva holística o integral es una visión de conjunto, tomando a los seres vivos como un sistema único en interacción entre sí y las cosas inorgánicas.

**Impacto ambiental.** Se dice que hay impacto ambiental cuando una acción o actividad produce una alteración favorable o desfavorable en el ambiente o en alguno de los componentes del mismo.

**Inocuo.** Término que significa libre de peligro, digno de confianza, que no produce injuria alguna. Certeza que la ingestión de un alimento no producirá enfermedad, mientras la ingestión sea en la forma y cantidad adecuada.

**Insumos.** Son materiales que entran al sistema ante la necesidad de utilizarlos y la carencia de productos sustitutos. Éstos comprenden a plaguicidas de uso agrícola, fertilizantes, abonos, semillas y material de propagación vegetal, agentes y productos biológicos para el control de plagas, productos de uso veterinario y alimentos para animales.

**Materia orgánica.** Son los restos de plantas y animales muertos, en proceso de descomposición, así como sus desechos, esta da lugar a la formación de humus.

**Materiales dendroenergéticos.** Recursos maderables que son utilizados como fuente de energía (combustible) y que generalmente son extraídos de su medio natural.

**Metales pesados.** Término que cubre los metales potencialmente tóxicos, utilizados en procesos industriales, por ejemplo; arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc. Estos tienden a acumularse en la cadena alimenticia.

**Metano.** Es un subproducto de la digestión anaerobia, también llamado gas de los pantanos por ser estos la principal fuente de emisión del mismo.

**Monocultivo.** Son agroecosistemas tan simplificados que producen un solo tipo de cultivo, una sola especie vegetal en poblaciones puras, por lo común en una extensión grande de terreno.

**Patógenos.** Microorganismos que pueden causar serias enfermedades en otros organismos, en animales y plantas o en humanos, por ejemplo, bacterias, virus o parásitos encontrados en estiércoles, desagües de granjas o áreas rurales pobladas por animales domésticos o salvajes.

**Relleno sanitario.** También denominado vertedero, es un terreno que se utiliza como depósito de los desechos que se generan en una zona urbana determinada en el que estos se esparcen en capas delgadas, se compactan y cubren con una capa fresca de arcilla o espuma de plástico cada día.

**Rumiantes.** Grupo de animales mamíferos a los que se les da el nombre de poligástricos, y cuya principal característica es un aparato digestivo compuesto: rumen, retículo, omaso y abomaso. El alimento poco masticado pasa a la panza donde fermenta; tras un tiempo pasa a la redcilla y retorna a la boca, donde es masticado de nuevo (rumia); luego el bolo alimenticio regresa al libro donde absorbe agua, y de allí al cuajar, donde es definitivamente digerido.

**Sanidad.** Conservación del buen estado sanitario de individuos, poblaciones y productos que pertenecen al reino vegetal o animal, considerándose a las especies agrícolas y forestales, domesticas y silvestres.

**Sustentabilidad.** Es el aprovechamiento de un recurso, proceso o agroecosistema en forma racional para asegurar su permanencia en el tiempo, sin alterar o cambiar negativamente sus componentes.

**Sustratos.** Materiales utilizados para producir o reproducir diversos seres vivos de ambientes tanto terrestres como acuáticos.

**Tecnología apropiada.** Es una técnica o aplicación científica, que permite la realización de actividades productivas con la utilización racional de recursos, sin afectar el ambiente de manera negativa.

**Tiempo de retención.** Es el lapso de tiempo que permanece una cierta cantidad de desechos dentro del biodigestor, hasta que se alimenta el mismo con otra cantidad similar.

**Troposfera.** Capa más baja de la atmósfera que contiene casi el 95% de la masa de aire terrestre y tiene entre 8 y 14 km de espesor, en esta zona es donde se producen la mayor parte de los fenómenos meteorológicos que determinan el clima y donde ocurren los grandes cambios climáticos.

**Vermicomposta.** Conocida mas comúnmente como lombricomposta, es una ecotecnología cuyo principal objetivo es la producción de abono orgánico utilizando una especie domesticada de lombriz como agente biológico en el proceso de transformación y reciclaje de la materia orgánica biodegradable.

## ANEXOS

### TABLA DE DATOS

VARIABLE: Producción biogás

TRATAMIENTO	BLOQUES			
	1	2	3	4
Cabras	111.1600	138.8900	147.7100	115.3400
Bovinos	166.5600	138.1000	103.4500	110.9200
Cerdos	108.0200	124.1600	102.5000	141.0900

### ANALISIS DE VARIANZA

FV	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	2	274.984375	137.492188	0.2117	0.816
BLOQUES	3	432.484375	144.161453	0.2220	0.878
ERROR	6	3896.515625	649.419250		
TOTAL	11	4603.984375			

C.V. = 20.28 %

### TABLA DE MEDIAS

TRATAMIENTO	MEDIA
Cabras	128.274994
Bovinos	129.757492
Cerdos	118.942497

REGISTRO DE TEMPERATURA DE LOS BIODIGESTORES

Dia	Marzo		Abril		Mayo	
	Mañana	Noche	Mañana	Noche	Mañana	Noche
	Cap Bov Por					
1			24 26 27	30 31 30	27 27 27	33 36 37
2			26 32 31	31 39 37	28 25 25	35 39 40
3			25 30 31	31 40 40	28 29 29	33 38 39
4			27 26 25	30 38 38	29 27 26	34 38 38
5			28 27 26	33 41 41	30 26 25	36 38 40
6			28 29 29	31 36 37	30 32 32	34 39 40
7			27 26 25	33 36 37	28 31 31	34 43 41
8			26 23 20	31 35 36	30 28 28	35 42 42
9			25 30 29	32 37 36	-- --	-- --
10			25 23 23	31 36 37	-- --	37 43 43
11			27 25 24	33 40 39	30 26 28	33 35 35
12			28 26 26	32 32 37	27 24 23	34 39 39
13			27 25 25	31 38 38	28 31 31	35 40 41
14			26 29 29	32 38 37	31 31 33	37 44 44
15			27 27 26	35 42 41	31 27 27	-- --
16			29 33 31	35 43 40	28 24 23	31 34 34
17			30 27 25	36 46 44	26 23 22	26 28 28
18			30 30 27	36 43 41	23 22 21	-- --
19			30 32 29	37 45 44	25 22 21	31 36 38
20			30 28 25	36 42 39	26 26 27	35 41 40
21			29 38 33		29 26 26	37 42 41
22			29 32 32	33 37 38	30 27 26	-- --
23	22 18 --	25 26 --			30 27 27	37 41 42
24	19 14 --	24 25 --	29 25 24		30 29 28	38 42 42
25	20 18 --	25 28 --	29 26 25	35 39 39		
26	20 21 22	26 29 30	28 26 26	35 39 40		
27	22 26 28	28 30 31		35 40 41		
28	23 22 24	29 30 32	30 29 29			
29	23 24 25	29 31 31	-- --			
30	-- --	-- --	-- --			
31	-- --	30 31 31	-- --			