



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA.

EFFECTO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA EN LA
CALIDAD DE LA BIODIGESTIÓN DE EXCRETAS PORCINAS CON
ÉNFASIS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

PRESENTA

EDUARDO EMILIO PÉREZ MARTÍNEZ

Asesores:

MVZ PhD Rafael Olea Pérez

MVZ MC Rosario Esperanza Galván Pérez



MÉXICO, D. F. 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis Profesores:

MVZ PhD Rafael Olea Pérez

MVZ MC Rosario Esperanza Galván Pérez

Dr. Carlos Gustavo Vázquez Peláez

Por su valiosa guía en este trabajo de investigación.

CONTENIDO

RESUMEN.....	4
LISTA DE ABREVIATURAS	5
I. INTRODUCCIÓN.....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA	13
Panorama general del uso de los biodigestores.....	13
Producción de metano en los biodigestores.....	16
El proceso de digestión anaerobia dentro del biodigestor.....	18
El tiempo de retención hidráulica en la calidad de la digestión anaerobia.....	21
Problemática en la operación de los biodigestores en México.....	22
Costos de los biodigestores en México	24
III. JUSTIFICACIÓN	27
IV. HIPÓTESIS	28
V. OBJETIVOS	28
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
Localización.....	29
Reactores anaerobios.....	29
Carga de los reactores anaerobios	30
Recolección del inóculo microbiano.....	31
Preparación de la carga de los reactores.....	32
Control de temperatura.....	33
Procedimiento	33
Evaluación de los reactores anaerobios.....	34
Cálculo de Metano	36
Análisis estadístico.....	37
VII. RESULTADOS	39
Evaluación microbiana de los reactores.....	39
Producción de biogás en los reactores anaerobios	40
VIII.- DISCUSIÓN	44
Evaluación microbiana de los reactores	46
Producción de biogás en los reactores	47
El pH, otro factor a considerar en el cálculo de metano	52
IX. CONCLUSIONES	55
X. ANEXO 1.....	56
XI. BIBLIOGRAFIA CITADA.....	57

RESUMEN

PÉREZ MARTÍNEZ EDUARDO EMILIO. Efecto del tiempo de retención hidráulica en la calidad de la biodigestión de excretas porcinas con énfasis en la producción de biogás. (Bajo la asesoría de MVZ PhD Rafael Olea Pérez y de MVZ MC Rosario Esperanza Galván Pérez).

En el actual auge de los biodigestores (BD) como tratamiento de excretas, la baja producción de biogás reportada en algunos de ellos, representa el mayor problema. Es probable que la pobre producción se deba al acumulo de lodos dentro del BD, lo que trae consigo el acortamiento del tiempo de permanencia de las excretas dentro del BD, llamado tiempo de retención hidráulica (TRH). El TRH es el principal factor que determina la máxima producción de biogás y la seguridad sanitaria del tratamiento. En este trabajo se determinó la línea de regresión del biogás en relación al TRH para obtener el volumen de biogás que se deja de producir por cada día menos de TRH. Para dicho propósito se evaluaron 7 diferentes TRH (10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 días) en reactores anaerobios con diez replicas por TRH. A los reactores se les determinó el volumen de biogás, el pH, los sólidos totales y las unidades formadoras de colonia por mililitro. La temperatura se registró diariamente. La ecuación de regresión se consideró bifactorial (TRH y temperatura). La cinética predicha por la ecuación se comportó positivamente, es decir a mayor TRH y a mayor temperatura el biogás aumenta, en el orden de 56.1ml por día de TRH y de 153.3ml por °C . Comparando lo obtenido en este y en otros estudios, se observó que la producción de biogás en digestores no alcanza los valores de referencia del Panel Internacional de Cambio Climático, los cuales son referencia para calcular el biogás que se espera obtener en un BD. Este hecho, junto con la falta de mantenimiento representan la principal causa de que algunos BDs no estén produciendo el volumen de biogás esperado.

LISTA DE ABREVIATURAS

BD	Biodigestor
BDs	Biodigestores
CERs	Certificado de Reducción de Emisiones
CO _{2e}	Bióxido de Carbono equivalente
DA	Digestión Anaerobia
FIRCO	Fideicomiso de Riesgo Compartido
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Panel Internacional de Cambio Climático
ln	Logaritmo natural
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
McC	Medio de cultivo MacConkey
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
TSA	Medio de cultivo agar tripticasa soya
UFC/ml	Unidades formadoras de colonias por mililitro

I. INTRODUCCIÓN

En la porcicultura y en general en la ganadería, el manejo de excretas es un rubro importante a cubrir desde el punto de vista ambiental y operacional de una granja, ya que dichas excretas liberan contaminantes al ambiente cuando no son tratadas o dispuestas adecuadamente,¹ emitiendo gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera,² descargando elementos eutroficantes tanto al suelo como al agua,^{3,4} y diseminando patógenos al ambiente.¹ A su vez, el no aprovechar o descargar incorrectamente este tipo de materia orgánica implica faltar con la reglamentación ambiental vigente en materia de descargas de aguas residuales.^{1,5,6} Además los malos olores, que de las excretas se desprenden pueden ocasionar molestias a vecinos.³

Para reducir la contaminación al ambiente provocada por las excretas existen varios tratamientos, como la separación de sólidos, el ensilaje, el composteo de sólidos, la digestión aerobia y anaerobia de excretas en fase líquida, entre los más usados en México¹. De estos tratamientos la digestión anaerobia es la que recientemente ha cobrado gran interés por parte de gobiernos y empresas privadas, gracias a que este tratamiento además de reducir el impacto ambiental, genera un biogás altamente rico en metano (CH₄), y el metano por su alto potencial de combustión puede ser usado como fuente de energía y generar ingresos extras.^{7,8}

La digestión anaerobia (DA), por la cual se genera el CH₄, es un proceso natural de degradación de la materia orgánica llevado a cabo por microorganismos en ambientes donde la luz y el oxígeno no están presentes o se encuentran limitados.⁹ En la naturaleza este proceso ocurre ampliamente en los sedimentos de lagos, mares y manglares, y en el tracto intestinal de animales.^{9, 10} La DA es llevada a cabo por microorganismos anaerobios

(hongos y bacterias) que interactúan simbióticamente para descomponer la materia orgánica en compuestos simples a base de Nitrógeno (N), Carbono (C) y Fósforo (P), como son los gases a base de C: bióxido de carbono (CO_2) y CH_4 ,^{11,12,13} ambos catalogados como GEI.² De esta manera, gracias a las bacterias metanogénicas propias de la DA es posible producir CH_4 a partir del carbono contenido en las excretas.^{11,12,13} Así mismo, gracias a la anaerobiosis, a los procesos de hidrólisis y acidogénesis que ocurren al principio de la DA, y a la competencia entre microorganismos por sustrato,^{9,10,12} se logra eliminar hasta el 99% de los patógenos originalmente contenidos en las excretas.^{14,15} Paralelamente, se reduce el mal olor de las excretas, siempre y cuando se consiga una adecuada DA.^{14,15}

Con el propósito de emplear la DA como tratamiento de excretas y otros desechos orgánicos como aguas residuales, se han diseñado los biodigestores (BDs), una tecnología que básicamente consiste en un contenedor herméticamente cerrado que facilita el almacenamiento de materia orgánica en anaerobiosis, permitiendo captar y almacenar el biogás producido,¹ evitando que el CH_4 escape a la troposfera y actúe como GEI.² El modelo básico de un BD y uno instalado en una granja porcícola de 500 vientres se muestran en las Figuras 1 y 2, respectivamente.

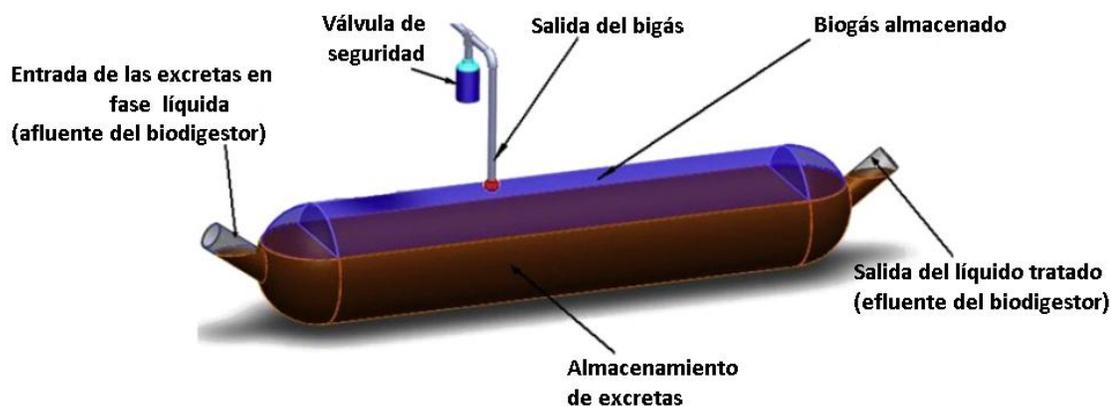


Figura 1. Modelo básico de un biodigestor tubular tipo Taiwán



Figura 2. Biodigestor instalado en una granja porcina de ciclo completo de 500 vientres en el Estado de Yucatán.⁽¹⁷⁾

Existen varios modelos de BDs, de los cuales el de tipo Taiwan (figura 1 y 2) es el que se utiliza con más frecuencia en la porcicultura Mexicana,¹⁶ ya que este tipo de BD permite un flujo continuo de excretas, es decir en ellos se introducen diariamente las excretas en fase líquida (afluente del BD) y diariamente se recoge el líquido tratado (efluente del BD),^{16,17} además este tipo de BD es económico si se le compara con otros sistemas de DA.¹⁸

La ventaja de usar este tipo de BD como tratamiento de excretas es que simultáneamente se capta el biogás microbiológicamente producido y se sanitiza el afluente, obteniéndose un biocombustible y un biofertilizante con alto valor energético y nutritivo, respectivamente.^{17,19}

En el caso del biogás captado y almacenado dentro del BD, este puede ser empleado directamente como combustible al ser quemado y generar calor, o en el mejor de los escenarios, puede ser transformado en energía eléctrica mediante un motogenerador de electricidad.¹⁷ En este sentido el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO)¹⁷ ha reportado que si el motogenerador es adecuado y el BD funciona adecuadamente, la

electricidad que se obtienen del tratamiento de las excretas de una granja porcina de ciclo completo puede cubrir y frecuentemente exceder las necesidades de electricidad que demanda la granja para realizar todas sus actividades.^{17,18} Aun si no se tiene la posibilidad de realizar la inversión para transformar el biogás en energía eléctrica, el solo quemarlo *in situ* evita su emisión a la atmosfera, favoreciendo al ambiente, ya que al quemar el biogás producido se logra convertir el CH₄ en CO₂ y debido a que el CH₄ es 23 veces más potente que el CO₂ como GEI la reducción de emisiones de GEI es substancial.^{2,19} Por dicha disminución de GEI, los BDs puede ser certificados como proyectos de “mecanismos de desarrollo limpio” (MDL) que son un instrumento impulsado por la ONU para allegar recursos económicos al mitigar la emisión de GEI. De esta manera los usuarios de BDs pueden obtener ingresos por venta de certificados que amparan la reducción de GEI en equivalentes de CO₂ (CO_{2e}), denominados bonos de carbón.^{8,17}

Aunado a los beneficios de usar el biogás, el efluente del BD, puede ser empleado como un biofertilizante rico en compuestos nitrogenados y fosforados de fácil disponibilidad para las plantas.²⁰ Además, gracias a que la DA facilita la eliminación de patógenos originalmente contenidos en las excretas, el uso del efluente de un BD que ha sido tratado adecuadamente representa un bajo riesgo sanitario cuando se usa como biofertilizante.^{1,7} Este biofertilizante puede sustituir los fertilizantes sintéticos y disminuir los costos por concepto de fertilización en campos de cultivo.⁷

Por todas las bondades anteriormente mencionadas que se obtienen al emplear los BDs, durante los últimos diez años este tratamiento se ha popularizado y ha cobrado gran interes,⁷ destinándose grandes recursos económicos para el fomento e implementación de esta tecnología en varios países, entre ellos México.^{8,21} En este sentido durante los últimos tres años el gobierno mexicano a través de FIRCO-SAGARPA ha destinado al menos 300

millones de pesos para la instalación de 305 BDs y 65 motogeneradores de electricidad,^{22,23} sumándose así, a los cerca de 400 BDs que venían operando en el país.¹⁷ De acuerdo con FIRCO²³ esta inversión podría representar una reducción en la eliminación de contaminantes a la atmósfera equivalente a más de un millón de toneladas de CO_{2e} anualmente, esta cantidad equivaldría a retirar de la circulación a 480 mil vehículos.

El conseguir esta meta depende de la buena operación de los BD, sin embargo en algunos BDs la producción de biogás no ha sido la esperada.^{8,17} De acuerdo con SAGARPA-FIRCO,¹⁷ y Lokey,⁸ el principal problema al que se ha enfrentado la implementación de esta tecnología ha sido la falta de mantenimiento y el poco conocimiento técnico y operacional de los BDs, lo que ha conllevado a un decremento en la producción de biogás y como el biogás representa el principal factor en la rentabilidad del BD, hay desconfianza en su utilidad.^{8,16,17}

De esta manera, el mantenimiento oportuno de los BDs es clave para lograr una buena producción de biogás, ya que de él depende la remoción de los sedimentos o “lodos” que a lo largo del tiempo se acumulan en el fondo del BD y que pueden ocasionar una pérdida en la capacidad de almacenamiento de materia orgánica, ocasionando que esta salga del BD antes del tiempo necesario para alcanzar el potencial máximo de producción de CH₄ de las excretas.^{17,24} Además, conforme aumenta el tiempo de acumulación de lodos se incrementa el costo para su remoción²⁵ y la dificultad de extracción.²⁶ En consecuencia es prioritario evaluar el azolve y otros factores que pudieran disminuir el volumen de biogás del BD. Varios factores pueden alterar la producción de CH₄ de un BD, de los que destacan: tiempo de permanencia en anaerobiosis, temperatura, porcentaje y tipo de materia orgánica, pH e inhibidores de crecimiento bacteriano como detergentes y antibióticos.^{11,24,27} Sin embargo considerando que el azolve es el principal problema y la reducción del volumen de

almacenamiento del BD su principal consecuencia,^{24,27} es prioritario evaluar el efecto del tiempo de permanencia de las excretas dentro del BD, llamado tiempo de retención hidráulica (TRH). Esta evaluación es de crucial importancia porque el TRH se ve reducido cuando la capacidad del BD disminuye,²⁸ y un inadecuado TRH compromete la productividad de esta tecnología.^{9,11}

El TRH óptimo para la producción de biogás y eliminación de patógenos en el BD depende de las condiciones físico-químicas que se establezcan dentro del BD.^{9,27} De estas la temperatura y el pH son las más importantes.¹⁰ Sin embargo cuando el volumen del afluente es grande y este proviene de una fuente homogénea, como es el caso de los drenajes de granjas porcinas, no se espera cambios significativos en estas variables.²⁷ En este sentido, la variación de TRH a causa del azolve del BD se supone ejerce el mayor efecto en la calidad de la DA.²⁷

Respecto a la calidad de la DA en relación al TRH, se sabe que se requiere menor TRH cuando aumenta la temperatura dentro del BD, así para rangos de temperatura de entre 25 y 40°C y de entre 40 y 55° el TRH óptimo es de 30 y 15 días respectivamente.²⁹ Sin embargo la mayoría de estos estudios son hechos en países de clima frío y en BDs que cuentan con sistemas de calefacción que ayudan a alcanzar mayores temperaturas, pues las condiciones atmosféricas no permiten la DA sobre todo en invierno.¹⁸ Dichas condiciones no se cumplen para los BDs ampliamente distribuidos en México, donde la temperatura ambiental anual no permitiría que el interior de los BDs llegue a estar por debajo de los cinco grados centígrados, que es el límite aceptable para que haya producción de biogás sin necesidad de instalar sistemas de calefacción en los BDs,¹⁸ por lo que el TRH recomendado ha sido de 30-40 días.²⁴ Los estudios de TRH en condiciones similares en la que operan los BDs en México con respecto al biogás son escasos, y aun más escasos en

cuanto a determinación de la calidad sanitaria del efluente se refiere.^{18,30} Por ello es importante conocer más de cerca el efecto que tiene el TRH sobre la calidad de la DA para las condiciones en las que se encuentran operando los BDs en México, y más si se tiene en cuenta el auge que actualmente tienen en el país.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Panorama general del uso de los biodigestores

El empleo de la DA como tratamiento de materia orgánica se conoce y se ha empleado desde principios de la segunda mitad del siglo pasado.¹⁶ Los primeros países en emplear esta tecnología fueron China e India con el propósito de solucionar problemas sanitarios ante la falta de drenaje en áreas rurales.^{16,31} Actualmente entre ambos países suman alrededor de 10 millones de BDs a pequeña escala o familiares para afrontar dichos problemas.^{7,18} Aunado al uso sanitario de estos BDs a nivel familiar, en América Latina se han implementado para dar tratamiento a la materia orgánica proveniente de empresas agropecuarias, principalmente de explotaciones porcinas y lecheras¹⁸. Destacándose países como Costa Rica, Brasil, Colombia, Bolivia, Perú y México en el aprovechamiento de esta tecnología.^{16,18} Por otra parte en Estados Unidos, y principalmente en Europa, las investigaciones y desarrollos en biodigestión anaerobia han sido dirigidos a sistemas a gran escala,¹⁶ en los cuales se tratan tanto desechos pecuarios como aguas residuales de ciudades obteniéndose energía con gran éxito, a tal grado que actualmente suman más de 600 plantas de DA en Europa.¹⁶

Sin embargo, a pesar de que el empleo de los BDs como tratamiento de excretas y de aguas residuales se conoce desde hace más de 50 años, no es sino hasta hace una década que los BDs se han popularizado ante la necesidad de afrontar los retos globales actuales,⁷ tales como el precio elevado del petróleo,³² y el cambio climático.² Ya que el aprovechamiento del CH₄ producido y captado en un BD es una opción real y accesible como fuente de energía alterna a los combustibles fósiles.^{18,17} Además los BDs son una medida eficaz para reducir las emisiones de GEI a la atmósfera, pues no es necesario que la materia orgánica

proveniente de granjas porcinas sea almacenada en lagunas de oxidación donde el CH₄ escapa a la tropósfera actuando como GEI.^{7,17,21}

En el panorama global, los BDs han sido una herramienta de apoyo para México, pues el gobierno Mexicano ha tomado un papel protagonista como impulsor de energías renovables o también llamadas “energías limpias”,³³ y como promotor de mecanismos en pro de reducir el impacto ambiental causado por la actividad humana,⁸ y en estas dos políticas los BDs tienen contribución.^{17,33,34} México ha sido el país más beneficiado en América Latina para obtener recursos internacionales destinados a la construcción de BD, e iniciar la certificación de proyectos para la reducción de GEI (CERs) dentro de los llamados mecanismos de desarrollo limpio (MDL).⁸ Dichos MDL son una política impulsada por la ONU, en la cual es posible obtener ingresos por la venta del CO₂ o su equivalente que se deja de emitir a la atmósfera (bonos de carbono).¹⁷ México espera aprovechar este mecanismo a tal grado, que para finales del año 2012 se tiene pronosticado que México cuente con más de 1,000 CERs.⁸ La importancia de los BDs que se están instalando en empresas pecuarias dentro de los MDL es tal, que de todos los CERs con los que cuenta México, el 56 % corresponden a BDs de granjas porcinas.⁸ El fomento que México ha dado al empleo de los BDs como tratamiento de excretas, igualmente se puede comprobar con los apoyos gubernamentales que SAGARPA ha otorgado a granjas porcinas y ranchos lecheros para la construcción de BDs e instalación de motogeneradores de electricidad.^{21,23} Apoyos que son otorgados conforme, y a través de los programas de: 1) uso sustentable de recursos naturales para la producción primaria, 2) apoyo directo para BDs, y 3) proyectos de mecanismos de desarrollo limpio programático, que SAGARPA-FIRCO otorga al sector primario.³⁴ Es así que con un monto de más de 300 millones de pesos por parte del gobierno y con una inversión total de más de 900 millones de pesos, en

el periodo 2008-2010 se logro la construcción de un total de 305 BDs y la instalación de 35 motogeneradores de electricidad.²² Siendo los Estados de Yucatán, Tamaulipas, Sonora y Jalisco los más favorecidos como se muestra en la Figura 3.²¹

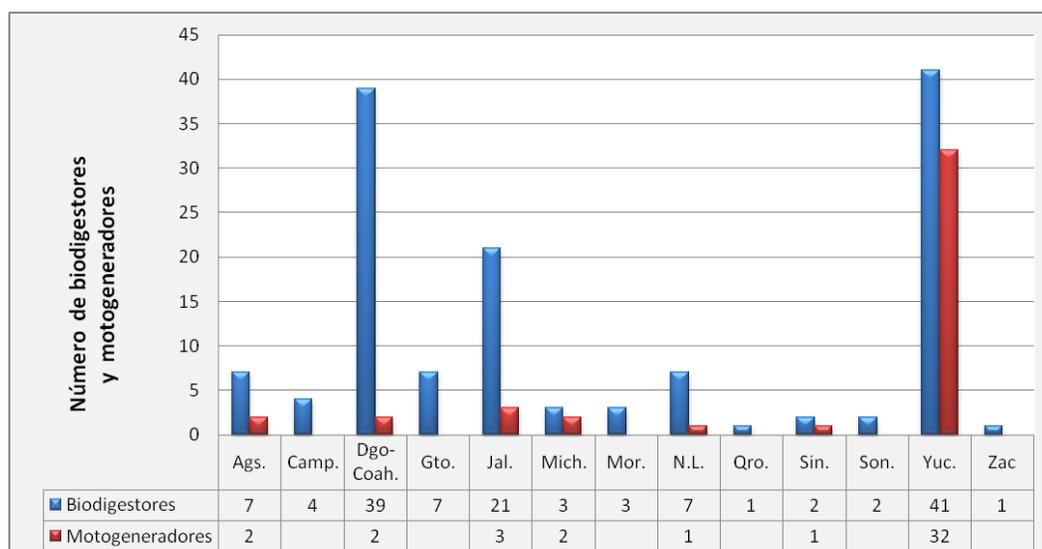


Figura 3 Número de BDs construidos por Estado con apoyo de FIRCO hasta el 31 de Marzo de 2010 ⁽²¹⁾

El ejemplo más claro del fomento de este tratamiento es el Estado de Yucatán, en el cual se han instalado 57 BDs en el mismo número de granjas, con lo cual se cubre el 90% de la porcicultura tecnificada con una reducción estimada de GEI de aproximadamente de 428,673 ton de CO_{2e} anualmente.²¹

Otro factor a considerar en el auge actual de los BDs en México es la necesidad, hoy más que nunca, de tratar las excretas con el fin de reducir la contaminación y el mal olor que de ellas se desprenden^{4,5} para cumplir con las reglamentación ambiental vigente, ya que desde enero del 2010 todas las granjas porcinas que excedan los máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-001-ECOL-1996⁵ están obligadas a dar tratamiento a sus desechos, o al pago de derechos de acuerdo a la Ley Federal de Derechos de 1991⁶. De este modo al incumplir con la reglamentación se pone en riesgo la rentabilidad de las granjas porcinas. En este sentido, Pérez⁴ en el año 2000 refiere que el pago de impuestos en

algunas granjas ubicadas en La Piedad Michoacán puede ser tan elevado como representar cerca del 10% del precio de un cerdo de 100 kilogramos.⁴

Con el apoyo otorgado para la instalación y operación de los BDs,²⁶ México surge como uno de los países de América Latina con mayor fomento y uso de este tratamiento como medida para reducir la contaminación por emisión de GEI y como medio para el aprovechamiento de las excretas producidas en empresas pecuarias.⁸ Además las empresas privadas han visto una oportunidad muy atractiva en el uso de BD en granjas porcinas, pues la producción de CH₄ que se logra generar con las excretas de cerdo puede ser muy alta.^{7,24}

Producción de metano en los biodigestores

El biogás resultante de la DA dentro del BD, es una mezcla de gases (Cuadro 1),²⁷ que por su alto contenido de CH₄ es una buena fuente de energía alterna,¹⁸ a tal grado que un metro cúbico de biogás con 60 % de CH₄ equivale a: 0.71 litros de gasolina, 0.55 litros de diesel y 0.45 litros de Gas LP; además esta cantidad de biogás transformado en energía eléctrica significa obtener 1.89 kw/h,²⁴ entendiéndose que a mayor porcentaje de CH₄ en el biogás el potencial energético de este último aumenta.¹⁸

Cuadro 1	
COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN UN BIODIGESTOR⁽²⁷⁾	
Componente	Porcentaje (%)
Metano (CH ₄)	50 – 75*
Bióxido de Carbono (CO ₂)	30 – 40*
Hidrógeno (H ₂)	1.0
Nitrógeno (N ₂)	0.1
Monóxido de Carbono (CO)	0.1
Oxígeno (O ₂)	0.1
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0.1

*La variación en el porcentaje depende del tipo de materia orgánica

La composición y el volumen de dicha mezcla de gases dependen sobre todo del tipo de materia orgánica y de la calidad de esta. En este sentido las excretas de cerdo son un buen tipo de materia orgánica, pues producen un elevado volumen de CH₄ por Kg de materia orgánica capaz de ser convertida a CH₄ (βo).³⁵ Además debido a que los cerdos son alimentados a base de granos, la disponibilidad de cadenas carbonadas aumenta. Al respecto, las excretas de cerdo comparadas con las de otras especies (Cuadro 2) son las que mayor volumen de biogás producen³⁶ y con un mayor porcentaje de CH₄,¹⁸ logrando obtener hasta 0.480 m³ de CH₄ por Kg de sólidos volátiles (SV),³⁷ es decir de aquellos sólidos capaces de ser transformados en CH₄.^{18,35}

Cuadro 2	
PRODUCCIÓN POTENCIAL DE BIOGÁS A PARTIR DE DIFERENTES EXCRETAS ⁽³⁵⁾	
Animal	m³ de biogás por Kg de MS*
Bovinos	0.281
Cerdos	0.640
Ovino/caprino	0.121
Aves de corral	0.359
Caballos	0.161
Conejos	0.359

*MS = materia seca

Debido al potencial de CH₄ capaz de ser generado mediante la excretas de cerdo, la implementación de BDs en granjas porcinas se ha popularizado como medida real y accesible para reducir los costos por concepto de energía eléctrica a través de la generación y uso del CH₄ como fuente a energía alterna.^{9,16} Sin embargo no hay que olvidar que el potencial de las excretas como generadoras de CH₄ depende de la buena DA dentro del BD.³⁵

El proceso de digestión anaerobia dentro del biodigestor

Como se mencionó anteriormente el auge de los BDs se debe a los beneficios ambientales y económicos que se obtienen de ellos al emplear sus dos productos, el CH_4 y el efluente.⁷ Ambos productos se producen gracias a que el BD al ser un contenedor herméticamente sellado permite la anaerobiosis de la materia orgánica que ingresa dentro de él.²⁷ Dicha anaerobiosis favorece que ciertos microorganismos anaerobios del tracto digestivo de los animales contenidos en las excretas crezcan, se reproduzcan y lleven a cabo la DA como medio para obtener sus propios nutrientes.^{9,10} La DA es por lo tanto un proceso de degradación de la materia orgánica compleja (carbohidratos, proteínas y grasas) en compuestos simples que sirven de nutrientes para los microorganismos.^{9,10,12} Así mismo durante el proceso de la DA se obtienen compuestos intermedios y finales del metabolismo microbiano, de estos el CH_4 es el más abundante.^{9,27}

Para entender cómo se produce el CH_4 , es necesario saber que la DA se lleva a cabo en diferentes etapas en las cuales intervienen diferentes microorganismos.^{9,11} El primer paso en la DA es la hidrólisis de la materia orgánica compleja como proteínas, carbohidratos y grasas en moléculas orgánicas solubles de menor tamaño como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos.^{9,12} La siguiente etapa es la acidogénica, donde estas moléculas de menor tamaño son fermentadas en alcoholes, cetonas y ácidos volátiles, los cuales son subsecuetemente convertidos en acetonas y CO_2 dando lugar a la fase acetogénica.⁹ Por último las bacterias metanogénicas convierten la gran mayoría del acetato en CH_4 durante la etapa de metanogénesis.⁹ La cronología de la DA y los compuestos del metabolismo microbiano se muestran en la Figura 4

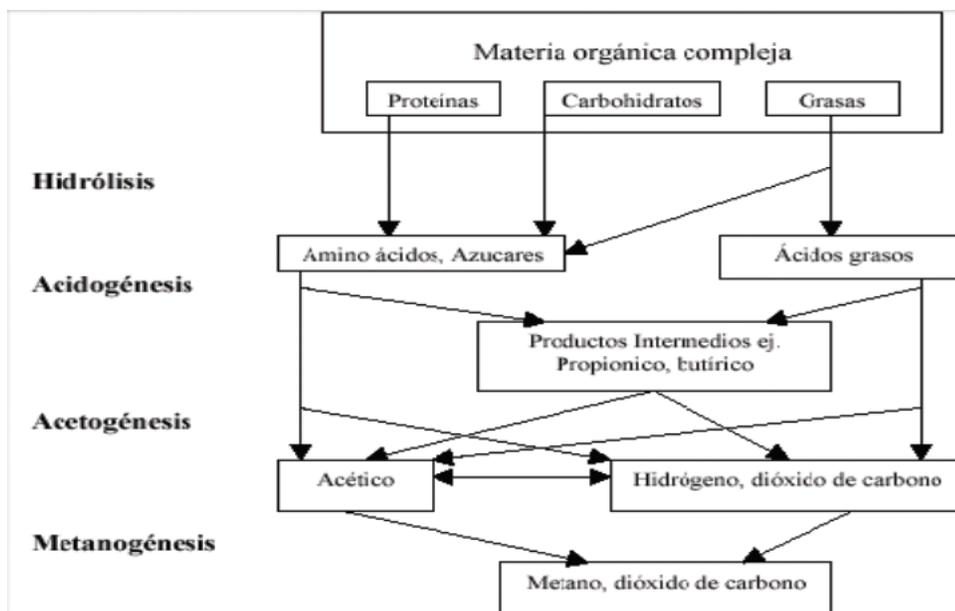


Figura 4. Etapas y compuestos químicos de la DA ⁽¹⁶⁾

Considerando que la DA es un proceso biológico es lógico entender que dicha biodegradación este en función de varios factores que alteran la actividad microbiana,⁹ como es el caso del tiempo de retención hidráulica (TRH), temperatura, tipo de materia orgánica, pH e inhibidores de crecimiento microbiano por mencionar a los más importantes.^{24,35} Sin embargo cuando se manejan grandes volúmenes de materia orgánica homogénea como es el caso de la porcicultura, el acortamiento del TRH en el BD por falta de mantenimiento representa el principal factor que determina la calidad de DA.²⁶ Sin embargo conocer la importancia de los demás factores permite entender el funcionamiento de un BD.^{24,27} Dentro de estos factores, la materia orgánica juega un papel primordial en la producción de CH₄, debido a que brinda el carbón necesario para la formación del CH₄.^{9,1} En concomitante la calidad de dicha materia está en función del porcentaje de carbohidratos capaces de ser metabolizados por los microorganismos, entendiéndose que a mayor porcentaje de estos, mayor será la producción de CH₄,^{16,35} por lo cual la ausencia de lignina en la dieta y de arena en las excretas son un factor importante a considerar,^{26,27} En

este sentido las excretas de cerdo al provenir de dietas ricas en granos y al ser recolectadas de piso de cemento, son idóneas para ser usadas como materia orgánica en los BDs.¹⁸ Referente al pH idóneo de la materia orgánica dentro del BD para que la DA se lleve a cabo de manera satisfactoria es necesario que dicha materia este un rango de pH de 6.8 a 7.5.^{24,29} Al respecto, al no existir reportes del pH del afluente como del efluente en los BDs, se asume que el pH de los BDs en México caen dentro de dicho rango, pues los BDs al solo recibir excretas de cerdo como única fuente de materia orgánica, la variación de pH por la entrada de sustancias ácidas o alcalinas al BD es difícil que se presente.²⁷ En cuanto a los detergentes y desinfectantes usados en granja, de entrar al BDs ocasionarían la muerte de la población microbiana,²⁴ por tal motivo con tan sólo desviar el afluente proveniente de los corrales que fueron lavados o desinfectado se evita que este tipo de inhibidores microbianos represente peligro para la producción de CH₄.²⁶ Por último el gran volumen de excretas dentro de un BD hace que la temperatura aunque determinante en el diseño y dimensionamiento inicial del BD,²⁷ no represente mucha variación respecto a la temperatura promedio ambiental una vez que el BDs se pone en marcha, afectando en poco el CH₄ esperado, pues para incrementar o disminuir considerablemente la temperatura al interior del BD se necesita de la pérdida o ganancia de una gran cantidad de energía.^{29,39}

En conclusión, se considera para efectos prácticos que los factores anteriormente mencionados varían en poco en un BD en campo, afectando mínimamente la producción de CH₄. Sin embargo no es así para el TRH, ya que la falta de mantenimiento reportada en muchos BDs^{8,26} hace suponer que la variación del TRH debido al azolve, ejerce el mayor efecto en la calidad de la DA.

El tiempo de retención hidráulica en la calidad de la digestión anaerobia

Como se mencionó en la introducción el TRH es el tiempo de permanencia de la materia orgánica dentro del BD.¹⁶ Un TRH adecuado permite que la materia orgánica permanezca expuesta a los microorganismos de la DA suficiente tiempo para que los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis descompongan los carbohidratos, grasas y proteínas en compuestos simples a base de C, N y P, donde los gases como el CO₂ y CH₄ cobran gran importancia^{9,10,11} De esta manera el TRH determina la producción del CH₄ y la seguridad sanitaria del efluente,¹⁶ de ahí la importancia de conocer el TRH del BD. Cuando la capacidad del BD es conocida, el TRH se puede calcular con la siguiente formula.

Formula 1:

$$\text{TRH} = \frac{\text{Capacidad del BD}}{\text{Carga Diaria}}$$

Sin embargo, en los BDs que se encuentran en operación con la misma Carga Diaria con la que fueron diseñados pero que carecen de un mantenimiento que remueva los sólidos acumulados dentro de ellos (azolve), es de esperar que el TRH sea menor, en concomitante, el TRH en estos BDs es difícil de predecir o calcular ya que no se sabe el volumen de almacenamiento del BD que ha disminuido por causa del azolve.^{26,27}

Igualmente hay que resaltar que cuando se construye un BD el dimensionamiento y el diseño se hacen de acuerdo a la carga diaria que se tratará y el TRH que se espera sea suficiente para tener la mayor cosecha de CH₄,¹⁷ Así despejando la capacidad del BD en la fórmula 1 se dimensiona correctamente el BD.²⁷ El TRH idóneo del BD está relacionado en gran parte con la temperatura ambiental, pues a mayor temperatura la actividad microbiana aumentara necesitando de un menor TRH.^{9,10,29} En este sentido se sabe que el

tiempo óptimo para rangos de 25- 40°C y de 40-55°C es de 30 y 15 días respectivamente.²⁹

El TRH para cada rango de temperatura así como el tipo de microorganismos se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 3		
TRH DE ACUERDO A LA TEMPERATURA EN LA QUE SE LLEVA A CABO LA DA ⁽²⁹⁾		
	Temperatura	TRH
Psychrophilica	< 25 °C	> 40 días
Mesophilica	25-40°C	30 días
Termophilica	> 40 °C	15 días

De esta manera, tomando en consideración el Cuadro 3 y la temperatura promedio de la región donde se ubica la granja, es posible determinar el TRH correcto para el diseño del BD y que permita la mayor cosecha de CH₄.^{17,26,27} El mantener el TRH conforme a lo planeado queda por lo tanto en función de mantener la Carga Diaria conforme al diseño del BD y del mantenimiento oportuno del BD²⁶

Problemática en la operación de los biodigestores en México

El conseguir la producción de CH₄ planteada en el diseño del BD depende del buen funcionamiento de estos, sin embargo la producción de CH₄ en algunos BDs no ha podido alcanzar el CH₄ esperado,²⁶ lo cual ha afectando seriamente la rentabilidad del BD.^{8,26} En cuanto al seguimiento de los BDs instalados en México destacan tres estudios, dos llevados a cabo por FIRCO- SAGARPA^{17,26} en el 2007 y 2010, y uno realizado por Lokey⁸ en el 2009.

De acuerdo con el primer reporte de SAGARPA-FIRCO,¹⁷ el principal problema subsecuente a la instalación de los BDs es la falta de mantenimiento y el poco

conocimiento operacional y técnico por parte de los productores, ocasionando que el volumen de CH_4 sea menor al esperado. En el segundo reporte de FIRCO,²⁶ más amplio en su contenido, pues incluye la evaluación de 345 BDs (56% de la población total de BDs) y que abarca aspectos de diseño, operación y mantenimiento de los BDs, se encontró como principales problemas la falta de mantenimiento, la inhibición de la producción de biogás, fugas de biogás en el sistema y las fallas en el funcionamiento de los equipos. Respecto al mantenimiento, se encontraron fallas en: la extracción de sólidos, el desazolve de tuberías, el retiro de agua de la geomembrana, el mantenimiento del quemador y en el mantenimiento de tuberías. En lo que concierne particularmente al retiro de sólidos se encontró que solo el 28 % de las granjas realizan este tipo de mantenimiento, y no todas lo hacen en tiempo y en forma correcta.²⁶

Por último en el estudio realizado por Lokey⁸ donde se evaluaron diez BDs en los estados de Puebla y Veracruz, el autor refiere como problema principal la falta de mantenimiento y la falta de comunicación entre la granja y la empresa asignada para la construcción y mantenimiento de los BDs, lo que ha conllevado a una disminución en la producción de CH_4 . Incluso de acuerdo con Lokey,⁸ algunas granjas han optado por abandonar los BDs ante su baja producción de biogás.⁸

Dentro de las actividades de mantenimiento cabe resaltar la importancia del retiro o remoción de los sólidos acumulados dentro del BD de dos a tres veces por año mediante el sistema de desazolve que posea el BD²⁶, de esta manera la remoción de sólidos permitirá que el TRH permanezca constante y de acuerdo al cálculo original.^{16,23,27} La importancia del desazolve dentro del mantenimiento toma más importancia si se considera la dificultad de retirar los sólidos acumulados después de largos periodos,²⁶ pues el sistema de extracción de sólidos del BD puede llegar a taparse, siendo necesario contratar a empresas

especializadas para el desazolve del BD,²⁶ aun para dichas empresas el desazolve puede llegar a ser complicado pues además de retirar toneladas de sólidos, no es posible determinar el grado de azolve del BD y la compactación de los lodos.²⁶ Aunado a las dificultades técnicas, los costos por retirar los lodos pueden ser muy elevados²⁵ puesto que requieren de personal y equipo especializado.²⁶ Pese a que no fue posible encontrar costos específicos para el desazolve de un BD donde los lodos se han compactado, como referencia de lo elevado que puede llegar a ser el costo cuando se complica el retiro de lodos, el gobierno del Estado de México paga alrededor de 400 mil pesos por desensolver una avenida y 500 mil por desazolver canales de desague²⁵, sistemas de conducción que no son tan frágiles como los de retiro de lodos de un BD. Dicho costo puede reducirse si se conoce el grado de azolve y se usa la técnica correcta de desazolve, desafortunadamente en la actualidad esto es muy difícil de predecir o calcular sin destapar el BD lo cual resultaría en el paro de la producción de biogás y en un costo extra por volver a sellar la membrana del BD.

La merma en la producción de CH₄ y los costos extras de desazolve en algunos BDs ha traído como consecuencia que algunos productores se desanimen con esta tecnología, inclusive opten por dejarlos de utilizar, pues al costo inicial de montar un BD no se logra recuperar.

Costos de los biodigestores en México

El costo de la implementación de un BD abarca varios rubros como el diseño, el equipo y el mantenimiento de los BDs.¹⁷ Estos rubros desglosados, de acuerdo con información de algunos proveedores, y sin incluir el motogenerador de electricidad representan diferentes

porcentajes del costo total, (Cuadro 4) de estos, el costo del BD es el que mayor gasto representa.¹⁷

El costo de la inversión depende principalmente del volumen total de materia orgánica que deban tratar las granjas y por lo consiguiente del inventario de animales.¹⁷ De acuerdo con FIRCO¹⁷ los costos aproximados son de \$1,462,570.0 para una granja de 1000 a 2500 cerdos, de \$2,019,784.0 para una de 5,000 cerdos y de \$2,577,000.0 para una granja con más de 10,000 animales. Datos más recientes señalan un costo de \$ 2,700,000 para granjas tecnificadas de más de 1,000 hembras reproductoras.²¹

Cuadro 4	
PORCENTAJE DE LOS COSTOS EN LA IMPEMENTACIÓN DE UN BD ⁽¹⁷⁾	
Concepto	Porcentaje del CT*
Ingeniería y Diseño	9.31
Fosa de mezclado	4.66
Biodigestor	62.1
Sistema de manejo de gases	6.21
Quemador	9.31
Laguna secundaria	7.76
Filtro	0.62
Total	100%

*CT= costos totales

Por otra parte, los costos en la inversión del motogenerador de electricidad dependerán del tipo de equipo y de su capacidad. En general el precio va desde cuatrocientos mil pesos hasta más de un millón de pesos.¹⁷ Sin embargo, se considera un precio actual de referencia \$730,000.00 para todo el sistema de generación de electricidad.²¹

A pesar de que los costos totales para la implementación de un BD son altos, hay que considerar, y tener en cuenta que con el uso de los BDs se obtienen ingresos que ayudan a

recuperar la inversión original.^{9,17,21} Los puntos económicamente favorables para la implementación de los BDs son los siguientes:

- Apoyos económicos por parte del gobierno.
- Disminución de costos por ahorro de energía.
- Ahorro por concepto de fertilización.
- Posibilidad de registrar y vender bonos de carbono a través de los Mecanismos de Desarrollo Limpio.

Puntos que ayudan a amortiguar el precio de la inversión original, a recuperar la inversión en un mediano plazo y a obtener ingresos extras.^{9,17}

Respecto a los apoyos gubernamentales y de acuerdo con las reglas de operación vigentes, el gobierno Mexicano a través de FIRCO puede aportar el 50% del costo del BD sin sobrepasar el millón de pesos, y el 50% del costo del motogenerador sin sobrepasar los 250,000 pesos.⁴⁰ En lo que concierne a los demás beneficios económicos mencionados en los capítulos anteriores, hay que sobresaltar que el conocimiento de estos es fundamental para incentivar a los productores ante los altos costos que representa la inversión inicial.^{17,33}

La rentabilidad de esta tecnología se refleja claramente considerando que si se incluyen todos los ingresos que se obtienen por el uso de un BD,^{9,17} la tasa de retorno de la inversión cuando el productor cubre todos los costos¹⁷ es de 3.7 años, y cuando no es posible vender los bonos de carbono, la inversión se recupera en 5 años.^{17.}

Con la información anterior queda claro que el uso de los BDs además de ser favorable al medio ambiente puede ser económicamente rentable si se le opera de forma correcta.

III. JUSTIFICACIÓN

La principal causa de la pobre productividad de biogás reportada en varios BDs en México apunta al azolve de lodos dentro del BD por falta de mantenimiento. En consecuencia el TRH seguramente es menor a lo calculado. Lo cual pone en riesgo la sanitización del efluente del BD, la producción de CH_4 y la recuperación de la inversión. Por tal motivo es necesario conocer la cinética de la productividad del biogás con relación al TRH, para que se estime el volumen de biogás que se deja de producir por cada día menos de permanencia de la materia orgánica dentro del BD.

IV. HIPÓTESIS

- El TRH de las excretas de cerdo dentro de un reactor anaerobio tiene una relación directa y positiva con la producción de biogás y la calidad sanitaria del efluente.

V. OBJETIVOS

- Determinar el efecto de la variación del TRH sobre el volumen de biogás producido por la DA a partir de excretas de cerdo.
- Obtener la línea de regresión y la ecuación de la cinética del biogás en relación al TRH
- Predecir la pérdida de la producción de biogás en un reactor anaerobio de acuerdo al TRH experimentado.
- Determinar la presencia de microorganismos en diferentes tiempos de retención.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El presente trabajo se realizó en una habitación cerrada con ventilación natural a través de persianas fijas dentro de las instalaciones del Departamento de Medicina y Zootecnia de Cerdos perteneciente a la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) de la Universidad Nacional Autónoma de México. El clima de la región es templado en verano y extremoso en invierno, la temperatura media es de 18°C y varía entre los 12°C y los 24°C.⁴¹ El experimento se llevó a cabo en los meses de Junio y Julio de 2011.

Reactores anaerobios

Para exponer el efecto del TRH sobre la calidad de la DA en los biodigestores en campo, se considero, al igual que en otros estudios,^{35,38,39} el efecto que tiene el TRH sobre la DA en pequeños reactores anaerobios de carga única, ya que en contraste con los BDs en campo, con dichos reactores anaerobios es posible probar muchos TRH al mismo tiempo, acortando considerablemente los días de experimentación que se tendrían al experimentar con un BD que opera en campo, al mismo tiempo es posible comparar diferentes TRH bajo las mismas condiciones de temperatura y materia orgánica. Dichos reactores anaerobios consistieron en frascos de plástico color negro con capacidad almacenamiento de un litro de agua, donde una vez llenos con las excretas de cerdo, se colocó y se conectó en su boquilla una bolsa de plástico con capacidad para cinco litros de agua donde se captó el biogás producido (Figura 5). Dicha bolsa se sujetó y se conectó al frasco con ligas de hule natural del número 64, y se reforzó a presión con un cordón de algodón. Antes de sellar la bolsa al frasco se aseguro de sacar a presión todo el aire contenido en la bolsa de plástico.



Figura 5. Reactor anaerobio utilizado en el experimento

Carga de los reactores anaerobios

La carga de los reactores consistió en una mezcla líquida de 80 litros; compuesta de excretas de cerdo (sustrato para la DA), de un inóculo con microorganismos de la DA (catalizador de la biodigestión) y de agua (diluyente). Las excretas de cerdo fueron colectadas de corrales de engorda con piso de cemento con no más de 24hrs de exposición al ambiente. El inóculo microbiano se obtuvo de la fase líquida de un cárcamo tipo cono con aproximadamente cinco metros de profundidad (Figura 6). Ambos, corrales y cárcamo están ubicados en el Centro de Enseñanza Investigación y Extensión en Producción Porcina de la UNAM en el municipio de Jilotepec Edo. De México.



Figura 6. Cárcamo del cual se obtuvo el inóculo microbiano

Recolección del inóculo microbiano

Antes de sustraer el inóculo microbiano del cárcamo, se aseguró la presencia de actividad metanogénica en el líquido del cárcamo al observar burbujeo en la superficie (Figura 7), indicativo de actividad de la DA. El inóculo se colectó introduciendo un bote de 19 litros a más de un metro de profundidad, donde la actividad metanogénica es estable. Se procuró no coleccionar el líquido de la superficie, ya que no es apto debido a su alto contenido de sólidos totales y por su estrecho contacto con el aire y rayos solares.



Figura 7. Extracción del inóculo microbiano. Obsérvese la actividad metanogénica

Para garantizar que los microorganismos no se vieran mermados por el posible contacto con el aire y con la luz solar, tanto el inóculo microbiano como las excretas se transportaron en botes opacos hermeticamente sellados. (Figura 8)



Figura 8. Recipientes utilizados para el transporte del inóculo microbiano y de las excretas

Preparación de la carga de los reactores

Con el propósito de semejar el porcentaje de sólidos totales (ST) contenidos en las aguas residuales de las granjas porcinas, se preparó una mezcla final de 80 litros con aproximadamente 15% de ST. Para lo cual, se determinaron de manera indirecta los ST de las excretas y del inóculo microbiano mediante la sedimentación de sólidos a través de centrifugación. Para cada caso, se dispuso de dos muestras de diez mililitros, las cuales fueron centrifugadas a diez mil revoluciones por minuto durante cinco minutos. Con lo cual se calculó la cantidad necesaria de componentes: 13 Kg de excretas, 50 litros de inóculo y 17 litros de agua. Posteriormente, en un recipiente con capacidad de 120 litros se mezclaron de veinte en veinte litros las excretas y el inóculo, procurando disolver lo más posible la mezcla. Dicho procedimiento duró media hora, después de lo cual se prosiguió a llenar cada uno de los 72 reactores. El tiempo transcurrido entre el llenado y sellado del primer reactor, al sellado del último reactor fue de aproximadamente 20 horas.

Control de temperatura

Una vez sellados todos los reactores, estos fueron colocados dentro de cajas de unicel (Figura 9), con el propósito de disminuir lo más posible la variación de temperatura que pudiera presentarse.



Figura 9. Alojamiento de los reactores anaerobios dentro de las cajas de unicel

Procedimiento

Para probar el efecto y encontrar la línea de regresión del TRH sobre la producción de biogás, la materia orgánica compuesta de excretas de cerdo e inóculo microbiano, se expuso a siete diferentes TRH: 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 días, más el control al día 0. Para tal propósito se utilizaron 72 reactores anaerobios de carga única con capacidad de un litro de materia orgánica y cinco litros de biogás. Pasando cada TRH se seleccionaron aleatoriamente diez reactores anaerobios, en los cuales se determinó el volumen de biogás producido, el pH, y las unidades formadoras de colonias por ml (UFC/ml) en medio MCc y TSA. A su vez, en cada TRH se registró la temperatura promedio y se determinaron los ST en laboratorio.

Evaluación de los reactores anaerobios

En cada uno de los diez reactores anaerobios correspondientes a un mismo TRH, se registró el volumen de biogás encontrado en cada bolsa, y se tomaron 6 ml de líquido (un ml para el conteo de UFC/ml en placa y 5 ml para la prueba de existencia de *salmonella spp.*) como muestra para el laboratorio de microbiología. Finalmente con el contenido de los diez reactores se preparo una mezcla de dos litros, que se congelo para su posterior determinación de ST en el laboratorio de Bioquímica, Nutrición y Toxicología de la FMVZ.

Producción de biogás. Se determinó obteniendo el volumen de la bolsa del reactor anaerobio. Dicho volumen se calculó por desplazamiento de volúmenes, al obtener la cantidad de agua desplazada dentro de un recipiente por el biogás de la bolsa. Para tal procedimiento se dispuso de una tina de 30 litros de capacidad; de un cono de plástico transparente de un litro de capacidad con graduaciones cada 100 ml, de colorante azul y de una libreta de anotaciones. Primeramente se lleno la tina con agua coloreada de azul (para mejor lectura del desplazamiento ejercido por el biogás), en ella se sumergió el cono graduado, una vez llenó el cono, se colocó casi en su totalidad fuera del agua, quedando la boca de este dentro del agua de la tina (con el fin de evitar el vaciado del cono). Por separado se desprendió la bolsa del reactor, asegurándose de no dejar escapar biogás, posteriormente se introdujo la bolsa en el agua de la tina, destapándose justo por debajo de la boca del cono, obteniendo como resultado el desplazamiento del agua contenida en el cono por acción del biogás liberado de la bolsa. El volumen fue determinado por los ml de agua desplazada en el cono, es decir por el biogás contenido dentro de las bolsas de los reactores anaerobios. En aquellas bolsas con un volumen mayor a un litro, el procedimiento

se repitió las ocasiones que fuesen necesarias, siempre teniendo cuidado de evitar fugas de biogás. Las bolsas que al momento de sumergirse se observó fuga de biogás, fueron descartadas del experimento. El procedimiento se realizó siempre por dos operarios y siempre de la misma forma.

Determinación de pH. La determinación de pH se obtuvo mediante la lectura de tiras reactivas de cada reactor minutos después de ser destapados.

Conteo de Unidades Formadoras de Colonias por ml. Para determinar esta variable se utilizó la técnica de conteo en placa en los medios de cultivo McC y TSA en diluciones décuples seriadas (10^{-1} a 10^{-10}) partiendo de una muestra de un mililitro para cada reactor. Las muestras se tomaron directamente de los reactores anaerobios inmediatamente después de haber cosechado el biogás; dichas muestras se tomaron introduciendo una pipeta de 10 ml en el líquido del reactor. Posteriormente, se realizaron las diluciones décuples seriadas y se sembraron los medios de cultivo. Una vez sembradas las placas, se incubaron a 36°C para su posterior lectura a las 48hrs. (Figura 10)

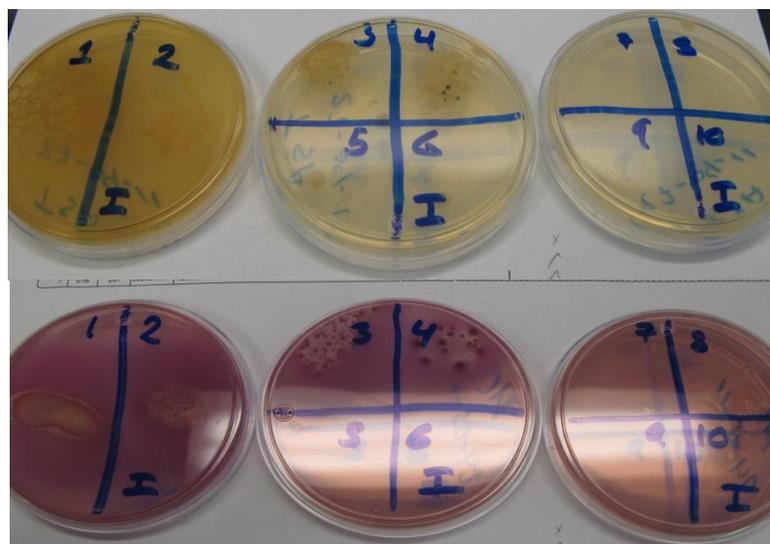


Figura 10. Colonias de microorganismos en medio TSA Y McC

Presencia de Salmonella. Las muestras de 5 ml por reactor para determinar la presencia de *Salmonella spp* se tomaron de la misma forma y al mismo tiempo que las muestras para el conteo de UFC/ml. Posteriormente cada muestra se incubó en caldo tetracionato durante 72 horas a 36 °C; sembrando a las 24, 48 y 72hrs en medio *Salmonella-Shigella* y en Verde Brillante para determinar crecimiento de colonias de *Salmonella spp*.

Temperatura diaria. Se tomó siempre en las mañanas (aproximadamente a las 10:00 am) mediante un termómetro digital de máximas y mínimas. El termómetro se colocó a nivel de las cajas de unicel. Del promedio de la máxima y mínima temperatura que el termómetro registró y guardó en su memoria se obtuvo la temperatura para el análisis e interpretación de resultados.

Determinación de Sólidos Totales. Para cada TRH se preparó una muestra de dos litros, posteriormente las muestras fueron enviadas al Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la FMVZ para que por medio del Análisis Químico Proximal se determinara el porcentaje de materia seca, el cual se asumió como los ST.

Cálculo de Metano

La producción de biogás en sistemas de biodigestión se reporta en m³ de CH₄ por kg de SV, por lo tanto fue necesario convertir el volumen de biogás obtenido a estas unidades. Para tal propósito se tomó el porcentaje de materia seca para asumir los gramos de ST de la carga de los reactores, así el volumen de biogás se dividió entre los gramos de ST para obtener el volumen de biogás obtenido por un gramo de ST. Posteriormente, y debido a que en este experimento no se determinó la concentración de CH₄ del biogás ni el porcentaje de SV sobre el total de ST, se asumieron los valores de 75% de CH₄ y de 80% de SV/ST que reportan Lasing *et al.*¹⁸ y El-Mashed *et al.*²⁹ para obtener el volumen de CH₄ producido por

gr SV, por tal razón el volumen de biogás por gramo se multiplico por 0.75 y después se dividió entre 0.8; obteniéndose de esta manera los m^3 de CH_4 por kg de SV. Se asumieron los valores de Lasing *et al.*¹⁸ y de El-Mashed *et al.*,²⁹ debido a que las excretas de cerdo, al igual que en este experimento, se recolectaron de corrales con piso de cemento y provenían de animales de engorda con alimentación a base de concentrado.

Análisis estadístico

Una vez obtenidos todos los datos, se corrió el estadístico descriptivo y las correlaciones para todas las variables, se calculó la cinética del biogás y la cinética de las UFC/ml para los medios TSA y McC. Para el análisis de datos se utilizaron los paquetes estadísticos SPSS19® y SAS®.

Variables independientes:

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Temperatura diaria (Temp)

Sólidos Totales (ST)

Variables de respuesta:

Volumen de biogás producido (Biogás)

Unidades Formadoras de Colonias por ml en medio de cultivo agar tripticasa soya (TSA).

Unidades Formadoras de Colonias por ml en medio de cultivo MacConkey (McC).

Potencial de hidrogeniones (pH).

Primeramente se obtuvo el análisis descriptivo de todas las variables, tanto las de respuesta como las independientes. Los valores de las variables TSA y McC fueron transformados a

logaritmo natural (ln) para normalizar su distribución y ser analizados. Posteriormente se corrieron correlaciones entre la temperatura y el biogás, y entre la temperatura y los medios de cultivo. Para calcular la ecuación de la cinética de las variables TSA y McC con respecto al TRH, se utilizó el método de regresión Gauss-Newton de modelos no lineales, siguiendo la ecuación general del modelo:

$$Y = \beta e^{-c(\text{TRH})}$$

Donde:

Y = valor predicho por la regresión

β = parámetro del modelo

c = constante

TRH = tiempo de retención hidráulica

Por último, la ecuación de la cinética de la variable biogás se obtuvo mediante regresión lineal bifactorial (TRH y temperatura) bajo el siguiente modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

Donde:

Y = valor predicho de biogás

β_0 = punto al origen

β_1 = cambio por unidad de x_1

β_2 = cambio por unidad de x_2

x_1 = TRH

x_2 = temperatura

ε = error

VII. RESULTADOS

Evaluación microbiana de los reactores.

Referente a las pruebas de laboratorio para evidenciar la presencia de colonias de *Salmonella spp* en los reactores anaerobios, en ninguna de las 72 muestras (diez de cada TRH y dos del control) se encontraron colonias de *Salmonella spp*. Sin embargo se encontró presencia de *Escherichia coli* para todas y cada una de las muestras (Figura 11).

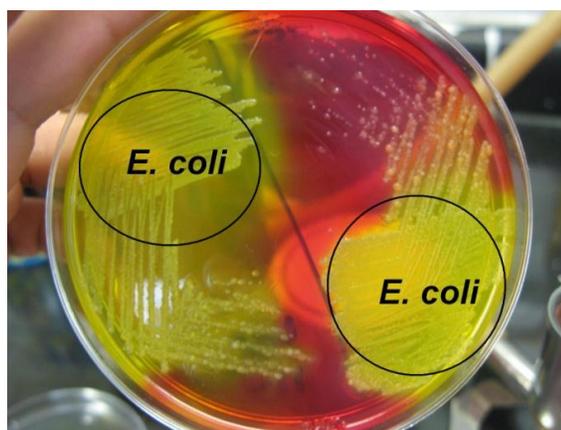


Figura 11. Presencia de *E coli* en medio Verde Brillante

El comportamiento de los microorganismos anaerobios facultativos a lo largo del experimento evidenciado por el cambio en la población bacteriana (numero de UFC/ml en TSA y McC) solo fue influido por el TRH ($p < 0.05$), ya que no se encontró correlación entre el número de UFC/ml y la temperatura, el pH o los ST ($p = 0.05$). Además la relación entre el TRH y el cambio en la población bacteriana no fue lineal, pues la R^2 para TSA fue de 0.031 y para McM de 0.001 en el modelo lineal, por lo que fue necesario usar una metodología adecuada para distribuciones no lineales (Gauss-Newton). Con el método de regresión Gauss-Newton se obtuvieron las ecuaciones:

$$\text{UFC/ml en TSA} = 7.8634e^{-0.00155(\text{TRH})} \quad \text{y} \quad \text{UFC/ml en McC} = 6.2614e^{0.000907(\text{TRH})}$$

Los resultados de las ecuaciones muestran que el tamaño de la población bacteriana que crece en el medio de cultivo McC no se modifica al aumentar el TRH ($p=0.0001$). En contraste la población bacteriana que creció en el medio de cultivo TSA disminuye conforme avanza el TRH ($p<0.0001$). Así, el crecimiento bacteriano tiende a disminuir conforme avanzan los días de biodigestión. Las UFC/ml observadas para cada TRH, así como la cinética de cambio en la población microbiana para ambos medios de cultivo se observa en la Figura 12.

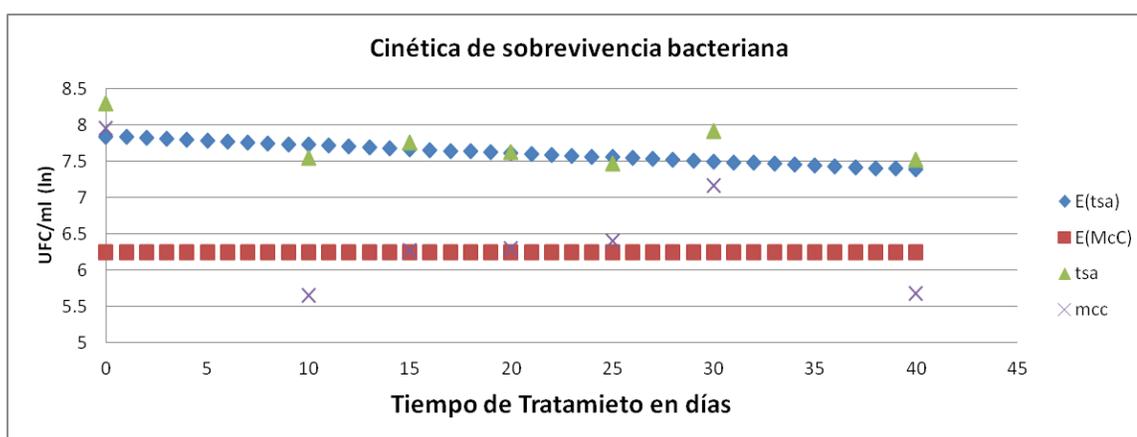


Figura 12. Cinética del cambio en la población bacteriana para ambos medios de cultivos respecto al TRH.

Producción de biogás en los reactores anaerobios

La temperatura y el TRH se correlacionaron positivamente con el volumen de biogás obtenido en los reactores ($p<0.001$). La temperatura ambiental fue en decremento conforme avanzó el experimento presentando un rango de 6 °C, es decir en 40 días la temperatura ambiental promedio descendió de 24.5°C al inicio del experimento a 18.5°C al final del experimento (Figura 13)

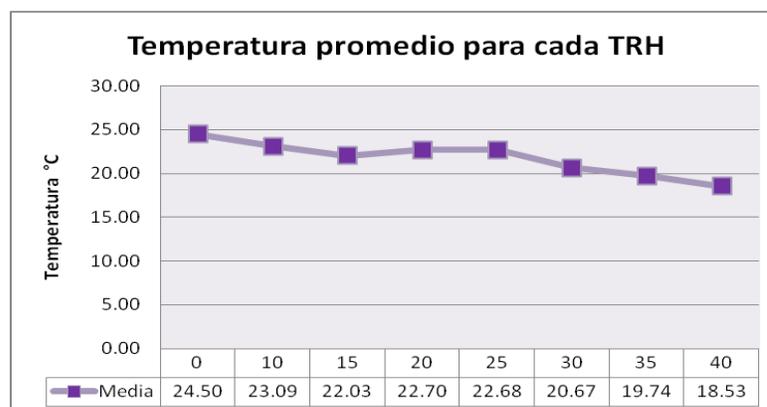


Figura13. Temperatura registrada a lo largo del experimento

La cinética de la producción de biogás se obtuvo mediante regresión lineal bifactorial (TRH y temperatura) bajo el siguiente modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$$

Ya que presentaba linealidad con una probabilidad de $p < 0.05$, el modelo fue adecuado para describir la ecuación de regresión. La ecuación resultante de la cinética del biogás con relación al TRH y temperatura fue:

$$y = -3171.91 + 56.136 \text{ TRH} + 153.319 \text{ temp}$$

Dicho modelo lineal obtuvo una R^2 de 0.68 y su cinética se comportó positivamente para ambos efectos, es decir a mayor temperatura y a mayor TRH la producción de biogás aumenta en el orden de 56.136 ml de biogás por día de retención hidráulica en el reactor y de 153.319 ml de biogás por grado centígrado de cambio de temperatura. Hay que considerar que la predicción de esta línea de regresión está limitada a un TRH menor a 40 días. El comportamiento de la producción de biogás con los diferentes TRH manteniendo la temperatura constante en 21.6°C (temperatura promedio en el experimento) se muestra en la Figura 14.

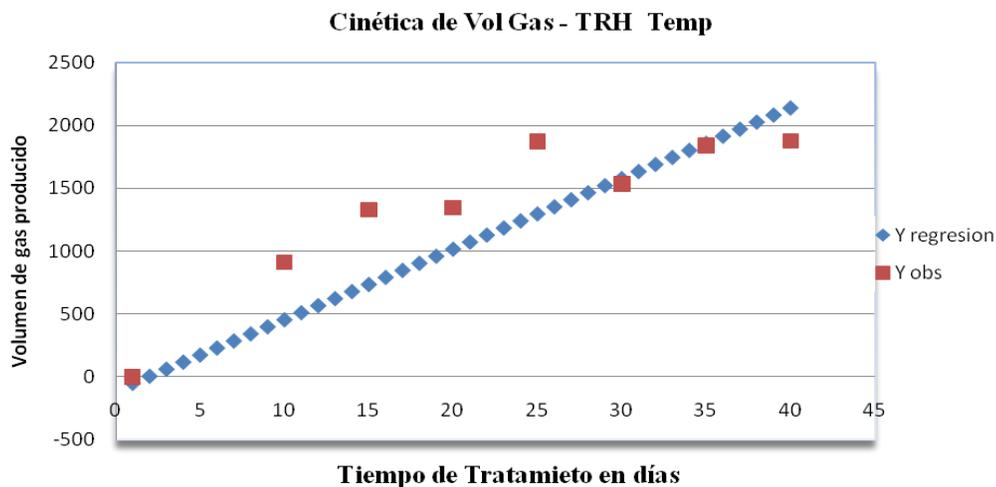


Figura 14. Cinética del volumen de biogás producido respecto al TRH cuando la temperatura se mantiene en 21.6.

Al comparar el efecto de la variación de la temperatura registrada en el experimento sobre la producción de biogás a un TRH de 40 días se encontró que el biogás producido con la temperatura promedio del experimento (21.5°C) disminuye en un 20% cuando la temperatura es llevada a la mínima registrada en el periodo de evaluación (18.5°C), como la cinética es lineal, la producción de biogás aumenta un 20% con la temperatura máxima registrada en el experimento (24.5°C) como se muestra en el Cuadro 5.

Los valores que describen el comportamiento estadístico para las variables que no tuvieron un efecto significativo en este experimento se desglosan en el anexo 1.

Cuadro 5
VARIACIÓN EN EL VOLUMEN BIOGÁS ESPERADO (ml) EN RELACIÓN A LA TEMPERATURA

TRH (días)	Mínima 18.5°C	Promedio 21.5°C	Máxima 24.5°C	Observada *
10	225.8	685.7	1145.7	911.9
15	506.5	966.4	1426.4	1,328.4
20	787.2	1,241.1	1707.1	1,345.0
25	1,067.8	1,527.8	1987.7	1,873.8
30	1,348.5	1,808.1	2268.4	1,537.0
35	1,629.2	2,089.1	2549.1	1,838.9
40	1,909.9	2,369.8	2829.8	1,876.0

* Promedio por grupo

VIII.- DISCUSIÓN

La validez del uso de reactores a nivel de laboratorio para modelar condiciones de campo para biodigestión anaerobia, como es el caso de este trabajo, se confirma principalmente cuando se cumplen al menos tres condiciones: la producción de biogás, el que haya una fase de acidificación en el tiempo de evaluación y que se establezca un ambiente anaerobio^{9,11,24}. En este experimento se observaron las tres condiciones. Concerniente a la producción de biogás, esta se observó visualmente desde el tercer día de experimento, lo que concuerda con los resultados encontrados por Chae *et al.*³⁹ y Boe *et al.*⁴² en los cuales se determinó la existencia de biogás desde el primer día de biodigestión. Respecto a la acidificación que se espera al principio de la DA debido a la acidogénesis,^{9,11} la carga de los reactores pasó de un pH con valor de siete el día que se llenaron los reactores a un pH con valor de seis en el día diez (TRH₁₀), concordando con lo reportado en trabajos anteriores, donde hubo un cambio de pH de un dígito.^{11,12} En cuanto a la existencia de anaerobiosis en los reactores, esta se pudo comprobar con la producción de biogás y al contrastar la cinética de las UFC/ml en ambos medios de cultivo, ya que el crecimiento en McC (el cual es un medio selectivo para bacterias gram negativas y en consecuencia para bacterias anaerobias y anaerobias facultativas) permaneció estadísticamente constante ($p=0.001$); en cambio las UFC/ml en TSA (medio general que permite crecimiento bacterias aerobias y anaerobias facultativas) presentaron una disminución estadísticamente significativa a lo largo del experimento ($p<0.001$), atribuible a la muerte de las bacterias aerobias contenidas al inicio del experimento debido al tiempo de anaerobiosis¹⁵.

Referente a las condiciones fisicoquímicas que se establecieron en los reactores anaerobios a lo largo de los 40 días de biodigestión, el promedio de pH registrado fue de 6.3. Este

valor de pH es ligeramente menor al valor de referencia de 6.4 - 7.6²⁷ y de 6.8-7.5²⁴ que se reporta en la literatura. Sin embargo a diferencia de otros reportes, en este experimento la fase acidogénica (con un valor de pH de 6) se prolongó hasta el día 25 de la DA, lo que bajo el promedio de pH (Figura 15) y posiblemente limitó el metabolismo microbiano y el inicio de la fase metanogénica. Esta elongación de la fase acidogénica puede tener varias causas, una de ellas es una alta cantidad de carbohidratos contenidos en las excretas,⁹ pero al no realizarse un análisis bromatológico completo no fue posible comprobar esta causa. Las repercusiones del pH observado a lo largo del experimento se discuten a fondo en el último subtema de este capítulo.

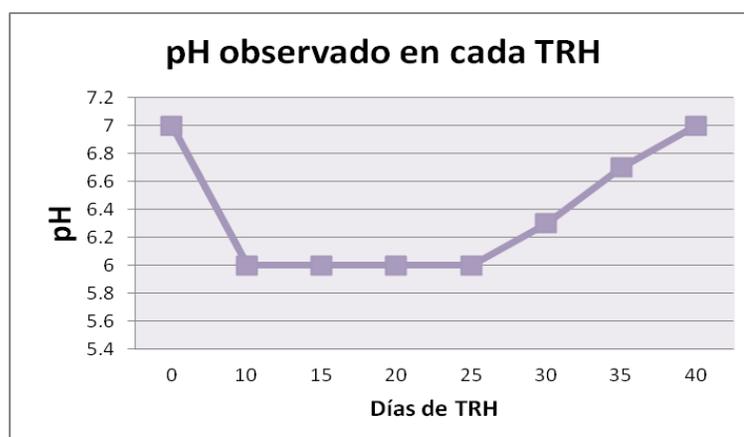


Figura 15. pH encontrado en los diferentes TRH

La temperatura de incubación no se mantuvo constante, pues se trató de simular las condiciones de campo en las que se encuentran los BDs y sólo se mantuvieron los reactores en cajas de unicel, así la variación de la temperatura en los reactores fue acorde los cambios de las condiciones climáticas de los días en los que se hizo el experimento. El permitir esta variación de temperatura se consideró un buen modelo para simular las condiciones en las que se encuentran los BD en campo, ya que el aislamiento térmico usado evitó las

variaciones drásticas de temperatura entre el día y la noche como sucede en los BD, solo que en los BD el volumen es el que evita las variaciones bruscas de temperatura.²⁶

Respecto al contenido de ST, el laboratorio reporto un 4.8% para el control y 5.0, 5.1, 5.2, 4.9, 5.0, 5.1, 4.9% de ST para los siete TRH en orden cronológico, lo que da un promedio de 5% de ST. Este porcentaje es usado con frecuencia en varios estudios con DA ya que permite un buen contacto de los microorganismos con la materia orgánica.^{18,39}

Evaluación microbiana de los reactores

La ausencia de *Salmonella spp* en las dos muestras del control y en las setenta muestras correspondientes a los siete TRH, evidencia que el manejo de las excretas en el Centro de Enseñanza Investigación y Extensión en Producción Porcina no contiene o no permite la sobrevivencia de *Salmonella spp*. Estos resultados son útiles como herramienta para apoyar el diagnóstico en el monitoreo de la salmonelosis en la pira.

A pesar de que la evaluación de la sanitización del efluente no fue un objetivo de estudio en este trabajo, los resultados encontrados en este experimento hacen suponer y son indicativos que el TRH de 40 días (bajo las condiciones fisicoquímicas en las que se realizó el experimento) es insuficiente para garantizar una adecuada sanitización, pues hubo crecimiento de *Echeriquia coli* para cada una de las muestras de los distintos tiempos de biodigestión. Sin embargo los resultados no son determinantes, pues no se realizaron pruebas de patogenicidad a las colonias de *Echeriquia coli*, por lo tanto no es posible determinar el riesgo microbiológico por usar el efluente del BD como biofertilizante agrícola. Por tal motivo para conocer el grado de sanitización del efluente en un BD en campo, este estudio debe ser complementado con otros, donde se detecten la presencia de

patógenos en diferentes fase del manejo de las excretas, incluyendo el del afluente del BD para evaluar su sobrevivencia después de permanecer cierto tiempo dentro del BD.

Producción de biogás en los reactores

Como se reporta en otros estudios, la producción de biogás fue influida positivamente por el tiempo de DA y por la temperatura. Al respecto, en trabajos de biodigestión donde la temperatura es el principal factor a evaluar, los resultados muestran que la producción de biogás aumenta considerablemente hasta los 35°C,³⁹ para después incrementarse de manera poco significativa hasta llegar a los 55°C^{37,43}. Igualmente se ha reportado que entre más se acerque el TRH al óptimo, la producción de biogás será mayor, pero pasado este valor óptimo, la producción de biogás empieza a decaer por falta de sustrato.⁹ Es de destacar que en ninguno de estos estudios se ha calculado una ecuación de regresión que prediga la cinética o comportamiento del biogás en relación al TRH y a la temperatura. Es por éste motivo que este trabajo toma una importancia singular ya que los resultados aquí encontrados marcan la pauta a seguir para establecer un metodología para el cálculo de la producción de biogás en los BD en operación, y en especial aquellos que tienen rendimientos inferiores a lo esperado por su diseño original.

Uno de los objetivos de este estudio fue obtener el volumen de biogás generado por día de TRH y por grado centígrado de cambio. En este sentido, la ecuación de regresión muestra un cambio positivo de 56.136 ml de biogás por día de retención y de 153.319 ml de biogás por grado centígrado de cambio, con un valor $\beta_0 = -3171.91$ ml de biogás. Estas estimaciones, aunque están limitados a predecir valores que encajen en condiciones similares a las descritas en este experimento, son de utilidad, pues las características de

temperatura y TRH son las que prevalecen en un gran número de BDs que actualmente operan en el país.^{17,26,41}

Debido a que la producción de biogás en sistemas de biodigestión regularmente se reporta en m³ de CH₄ por kg de SV, el primer paso para comparar los resultados de este trabajo fue convertir el volumen de biogás obtenido en la ecuación a estas unidades siguiendo la metodología descrita en el capítulo de materiales y métodos. De esta manera y como ejemplo, utilizando la ecuación para un TRH 40 días a 21.3°C (temperatura promedio del experimento) se obtiene un volumen de 2,385.169 ml de biogás, el cual después de ser transformado da un total de 0.045m³CH₄/KgSV. En el Cuadro 6 se detallan las transformaciones consecutivas para obtener el metano en m³/kg SV.

Cuadro 6					
PRODUCCIÓN DE METANO PARA EL TRH DE 40 DÍAS					
ml de Biogas	mlCH ₄ *	ml CH ₄ /g ST**	ml CH ₄ /g SV***	LCH ₄ / Kg SV	m ³ CH ₄ /Kg SV
2,385.17	1,788.88	35.778	42.933	42.933	0.043

* 75% de CH₄
 ** 5% de ST
 *** 80% de los ST

Al contrastar el volumen de CH₄ predicho por la ecuación y ajustado a las condiciones de temperatura y TRH en las que otros autores llevaron a cabo sus experimentos,^{35,39,44} se pudo observar que el volumen de CH₄ predicho por la ecuación es menor a lo reportado por otros autores,^{35,39,44} y menor a los valores que el Panel Internacional de Cambio Climático (IPCC)³⁷ señala como referencia para la producción máxima de CH₄ (β₀) a partir de excretas de cerdo.

Como se observa en el Cuadro 7 los volúmenes predichos por ecuación de este experimento son más bajos que los referidos por los autores^{35,39,44}. Aun que ni los valores de la ecuación

ni los obtenidos por otros experimentos consiguen ser iguales a los valores de referencia del IPCC.³⁷

Cuadro 7
COMPARACIÓN DEL CH₄ OBTENIDO EN DISTINTOS ESTUDIOS CON RESPECTO AL POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE CH₄ DEL IPCC⁽³⁷⁾

Referencia	Condiciones		Producción de CH ₄	
	temperatura	días TRH	m ³ CH ₄ / Kg SV	% del β ₀ *
β ₀ IPCC 2006	∞ *	∞	0.480	100.0
BD IPCC*	18	∞	0.370	77.0
Alvarez <i>et al.</i> 2008	18	30	0.045	9.0
CH ₄ de ecuación	18	30	0.024	5.0
β ₀ IPCC 2006	∞	∞	0.480	100.0
BD IPCC	22	∞	0.374	78.0
Alvarez <i>et al.</i> 2008	22	30	0.080	16.0
CH ₄ de ecuación	22	30	0.035	7.4
β ₀ IPCC 2006	∞	∞	0.480	100.0
BD IPCC	25	∞	0.379	79.0
Chae <i>et al.</i> 2008	25	20	0.312	65.0
CH ₄ de ecuación	25	20	0.033	7.0
β ₀ IPCC 2006	∞	∞	0.480	100.0
BD IPCC	28	∞	0.384	80.0
Moller <i>et al.</i> 2004	35	25	0.356	74.2
CH ₄ de ecuación	35	25	0.083	17.3

∞ = Indeterminado

β₀ = Producción máxima de CH₄ a partir de excretas de cerdo para América del Norte según el IPCC⁽³⁷⁾

BD IPCC = Producción de CH₄ a partir de sistemas de digestión anaerobia según el IPCC⁽³⁷⁾

Los valores predichos por la ecuación fueron semejantes con los resultados obtenidos por Alvarez *et al.*⁴⁴ quienes midieron el biogás producido en un BD a pequeña escala sometido a variaciones ambientales y en consecuencia no se controló la temperatura, el pH, los inhibidores de crecimiento bacteriano y la calidad de la materia orgánica, es decir, tal y

como operan regularmente muchos los BD en campo. De esta manera Álvarez *et al.*⁴⁴ lograron obtener a 18°C un volumen igual a 0.045 m³CH₄ / Kg SV (9.4% del total del βo que señala el IPCC para la región de América del Norte) y de 0.080 m³CH₄ / Kg SV (16% del βo) cuando llevo el experimento a una temperatura promedio de 22°C. Sin embargo, a pesar de que la producción de CH₄ de Álvarez *et al.*⁴⁴ es bajo con respecto a los valores del IPCC,³⁷ el volumen en m³ de CH₄ por Kg de SV es aproximadamente del doble al obtenido en este trabajo cuando se ajustan con la ecuación de regresión. (Figuras 16 y 17). Esta pobre cosecha de biogás es atribuible, como se discutirá en el subcapítulo siguiente, a la variación de factores que no se lograron controlar como el pH.

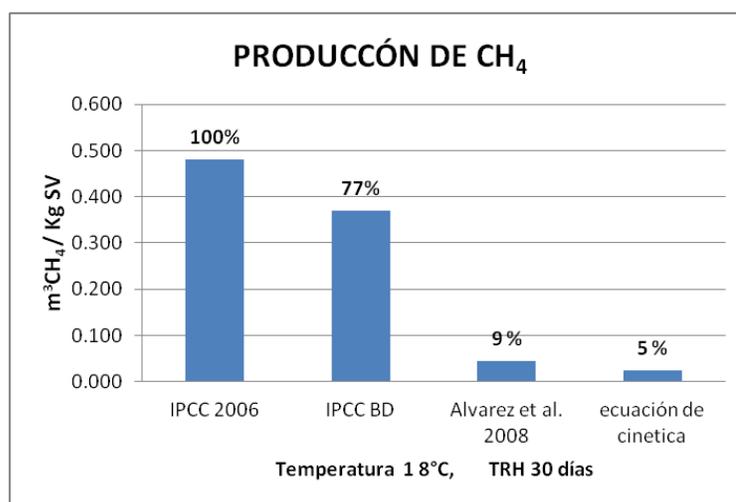


Figura 16. Comparación de la producción de CH₄ con el potencial máximo recomendado por el IPCC⁽³⁷⁾ cuando la temperatura es de 22°C el TRH es de 30 días

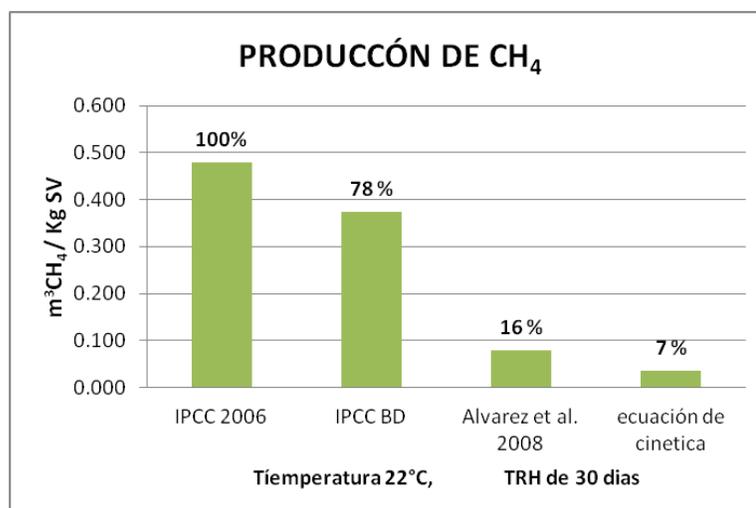


Figura 17. Comparación de la producción de CH₄ con el potencial máximo recomendado por el IPCC⁽³⁷⁾ cuando la temperatura es de 22°C

En contraste, en los experimentos realizados a nivel laboratorio bajo condiciones controladas llevados a cabo por Chae *et al.*³⁹ y Moller *et al.*,³⁵ en donde se mantuvo una temperatura constante, se filtraron las excretas de cerdo para evitar partículas grandes, se inocularon bacterias anaerobias y se adicionaron amortiguadores de pH; la producción de CH₄ fue considerablemente mayor a lo obtenido en este estudio y al obtenido por Álvarez *et al.*⁴⁴ (Figuras 18 y 19). Pero a pesar de que Chae *et al.*³⁹ y Moller *et al.*³⁵ tuvieron el cuidado de proporcionar las mejores condiciones a la materia orgánica para su digestión, en ninguno de estos dos trabajos se pudo alcanzar el volumen de CH₄ que el IPCC³⁷ señala como referencia para sistemas de DA como los BD. Aun más, hay que considerar que las condiciones en las que Chae *et al.*³⁹ Moller *et al.*³⁵ llevaron a cabo su experimento no son por mucho las que prevalecen en un BD en campo, por lo tanto es de suponer que los valores señalados por el IPCC están sobrevalorados.

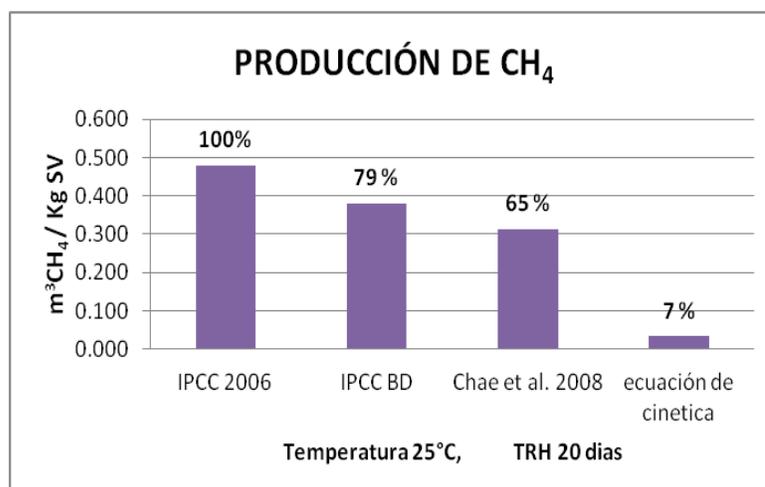


Figura 18. Comparación de la producción de CH₄ con el potencial máximo recomendado por el IPCC⁽³⁷⁾ en condiciones controladas a una temperatura constante de 25°C.

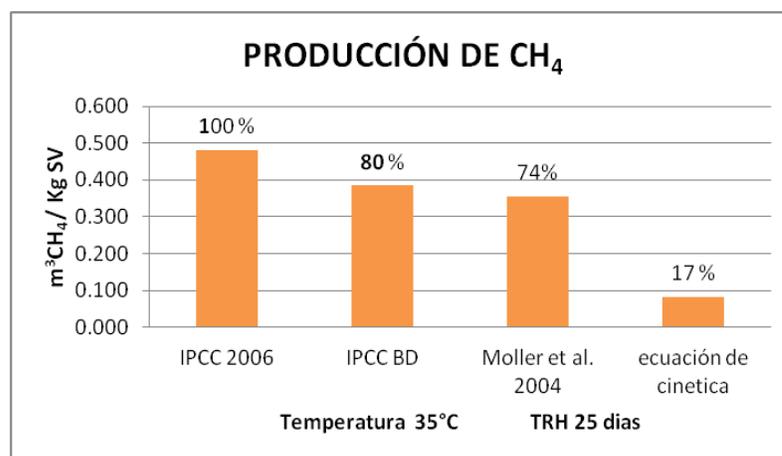


Figura 19. Comparación de la producción de CH₄ con el potencial máximo recomendado por el IPCC³⁷ en condiciones controladas y temperatura de 35°C.

El pH, otro factor a considerar en el cálculo de metano

A pesar que el volumen de CH₄ obtenido en todas las investigaciones revisadas en este estudio está por debajo de los valores que el IPCC³⁷ señala para el caso de BDs que tratan excretas de cerdo; el volumen de CH₄ calculado mediante la ecuación obtenida en este trabajo es pobre. Y es pobre, porque si se le compara con trabajos similares como el de

Álvarez *et al.*,⁴⁴ donde igualmente no se usaron amortiguadores de pH, no se filtraron las excretas, y no se determinó la calidad de la materia orgánica; el volumen de CH₄ predicho por la ecuación de la cinética del biogás resulta ser aproximadamente la mitad de lo obtenido por Álvarez *et al.*⁴⁴ Esta menor producción de biogás obtenida con la ecuación puede ser atribuible principalmente a que hubo una elongación de la fase acidogénica en el experimento, pues el pH permaneció con un valor constante de 6 hasta los 25 días TRH (figura 20), siendo que dicha fase tiene una duración de aproximadamente de 15 días en climas templados.¹⁰ Este hecho traería como consecuencia el retraso de la fase metanogénica y por ende, una menor producción de CH₄.^{9,10}

Como se puede observar en la gráfica de cajas de la Figura 20, la variación en el volumen de biogás cosechado en el experimento a partir de reactores de un mismo TRH se fue normalizando a partir del día 25, justo cuando el pH empieza a aumentar, para finalizar con la menor variación entre el biogás cosechado de un mismo TRH para el día 40. La normalización a partir del día 25 de biodigestión, es por lo tanto, atribuible al incremento en el promedio de pH de los reactores anaerobios. Por los resultados anteriores, se asume que la prolongada duración de la fase acidogénica haya provocado la pobre producción de biogás en los reactores anaerobios y por consiguiente, el pobre volumen de biogás que la ecuación predice; pues probablemente si la fase acidogénica hubiera durado menos, la normalización del biogás cosechado se hubiera presentado antes, abarcando la mayoría de los TRH, con lo cual, ante una menor variación en la producción de biogás, la ecuación predeciría mejor los valores reportados por otros autores.

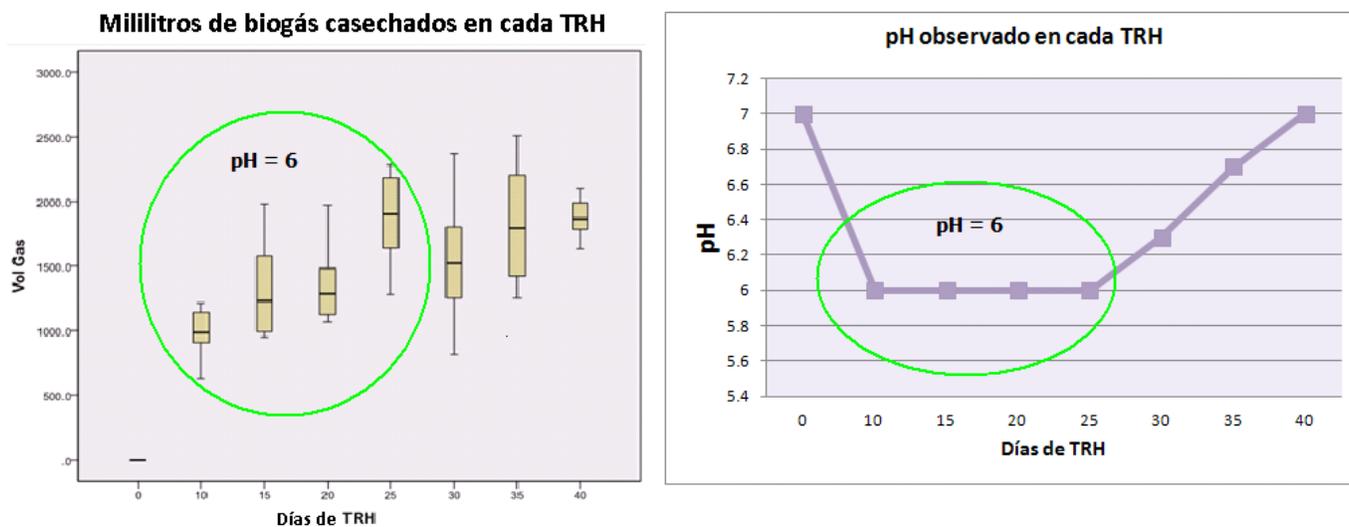


Figura 20. Volumen de biogás cosechado cuando el pH fue igual a 6

En conclusión, es recomendable que se realicen más evaluaciones del efecto del pH en la producción de CH_4 para que se tome en cuenta esta variable en el afluente del BD y poder predecir mejor el cálculo de producción de CH_4 . Adicionalmente con lo obtenido en este trabajo de investigación, es prioritario complementar este experimento con otros donde se abarque un mayor rango de temperatura y de TRH, además de controlar el pH.

IX. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en este y otros trabajos son indicativos que los valores de referencia para la producción de CH_4 a partir de excretas de cerdo que el IPCC señala para la región de América del Norte³⁷ están sobre valorados. Este hecho, junto con la falta de mantenimiento en muchos BD de México, puede ser una de las causas de la pobre producción de biogás reportada en algunos BDs, pues en la planeación de un BD, el presupuesto de CH_4 se calcula tomando en cuenta los valores de referencia del IPCC. Por lo tanto es necesario que en la planeación de un BD se considere además de la temperatura y tipo de materia orgánica otros factores como el pH.

Es posible asumir que bajo las condiciones actuales de temperatura en las que se encuentran funcionando muchos BDs de México (principalmente climas templados), aunado a la posible sobrevaloración en los cálculos de CH_4 a producir en un BD, el TRH de 40 días que regularmente se emplea para la operación de los BDs es insuficiente para alcanzar la máxima producción de CH_4 .

X. ANEXO 1

Cuadro 11
INFORME DESCRIPTIVO POR TRH

TRH*	ml de Biogás	UFC/ml TSA	UFC/ml Mc C	pH
0				
Media	0	25×10^7	9×10^7	7.0
Desv. Est.	0	21.2×10^7	1.41×10^7	0.0
10				
Media	912	8.5×10^7	0.11×10^7	6.0
Desv. Est.	301	8.4×10^7	0.16×10^7	0.0
15				
Media	1,328	10.2×10^7	1.15×10^7	6.0
Desv. Est.	359	12.6×10^7	3.11×10^7	0.0
20				
Media	1,345	8.54×10^7	0.23×10^7	6.0
Desv. Est.	274	12.4×10^7	0.12×10^7	0.0
25				
Media	1,874	4.4×10^7	2.50×10^7	6.0
Desv. Est.	354	4.07×10^7	6.26×10^7	0.0
30				
Media	1,537	11.4×10^7	3.12×10^7	6.3
Desv. Est.	422	8.1×10^7	5.34×10^7	0.5
35				
Media	1,839	2.2×10^7	2.49×10^7	6.7
Desv. Est.	441	2.32×10^7	2.71×10^7	0.5
40				
Media	1,876	7.58×10^7	0.08×10^7	7.1
Desv. Est.	347	$8,73 \times 10^7$	0.11×10^7	0.3

Cuadro 12
ESTADISTICO DESCRIPTIVO DE TODOS LOS
RECTORES EN CONJUNTO

	N	Rango	Media	Desviación estandar
Biogás (ml)	67	2,600.0	1,481	539.7
UFC/ml TSA	72	39.8×10^7	80.3×10^6	96.5×10^6
UFC/ml Mc C	72	19.9×10^7	15.9×10^6	37.1×10^6
pH	72	2.0	6.3	0.5

XI. BIBLIOGRAFIA CITADA

1. TAIGANIDES EP, PÉREZ-ESPEJO R, GIRÓN-SÁNCHEZ E. Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. México (DF). Consejo Mexicano de la Porcicultura A.C. 1996.
2. HOUGHTON JT, DING Y, GRIGGS DJ, NOGUER M, VANDER-LINDEN PJ, DAI X, MASKELL K, JOHNSON CA. Climate Change 2001: the scientific basis. Report of the IPCC working group I. 2001.
3. BACKUS GBC, VAN WAGENBERG CPA, VERDOES N. Enviromental impact of pig meat production. Meat science 1998;49:565-562.
4. PÉREZ-ESPEJO R. Producción porcicola y contaminación del agua en La Piedad Michoacán. México DF. Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM, 2000.
5. DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. REFORMA DE NOM-001-ECOL-1996. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México DF. Secretaria de Ambiente y Recursos Naturales. 23 de Abril del 2003.
6. DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. Reforma de Ley Federal de Derechos 1991. Artículos 278-C y 283 México DF.de 24 de Diciembre del 2007.
7. YIRIDOE EK, GORDON R, BROWN BB. Nonmarket benefits and economic feasibility of on farm biogas energy production. Energy policy 2008;37:1170-1179.
8. LOKEY E. The shane destruction projects in México. Renewable Energy 2009;34: 566-559.
9. ANGELIDAKI I, KARAKASHEV D, BATSTONE D, PLUGGE CM, STAMS A. Biomethation and its potential. Methods in enzymology 2011;494:327-351.
10. DHAKED-KUMAR R, SINGH P, SINGH L. Biomethation under psychorophilic conditions. Waste Management 2010;30:2490-2496.

11. RIVARD C, BOONE D. The Anaerobic Digestion Process. Second Biomass Conference of the Americas, Portland Oregon. Golden, CO National Renewable Energy Laboratory 1995:785-790.
12. SHULTER A, BEKEL T, DIAZ N, DONDRUP M, EICHENLAUB R, GARTEMANN KH, KRAUSE, L. *et al.* The metanome of biogas producing microbial community of a production-scale biogas plant fermenter analysed by the 454-pyrosequencing technology. *Journal of Biotechnology* 2008;136:77-90.
13. RASTOGI G, RANADE D, YELOE T, PATOLE M, SHOUCHE Y. Investigation of methanogen population structure in biogas reactor by molecular characterization of methyl-coenzyme M reductasa A (*mcr A*) genes. *Bioresource Technology* 2008;99:5317-5326.
14. COTE C, MASSE DI, QUESSY S. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries. *BioresourceTechnology* 2006;97:686-691.
15. MARTIN JH. Comparison of Dairy Cattle Manure Management with and without Anaerobic Digestion and Biogas Utilization. Eastern Research Group Inc Boston MA 1998:324.
16. LUSK PD. Methane Recovery from Animal Manures: The Current Opportunities Casebook. National Renewable Energy Laboratory US Department of Energy, Washington, DC 1998:5-30.
17. SAGARPA-FIRCO. Aprovechamiento de biogas para la generación de energía electrica en el sector agropecuario. *Claridades Agropecuarias* 2007. [http://www.cmp.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO de BIOGAS.pdf](http://www.cmp.org/apoyos/BIOGAS0902/0524_LIBRO_de_BIOGAS.pdf).
18. LASING S, VIZQUEZ J, MARTINEZ H, BOTERO R, MARTIN J. Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anerobic digestion system. *Ecological engineering* 2008;34: 332-248.

19. NELSON C, LAMB J. Haubenschild farms anaerobic digester. Final report, The Minnesota Project St. Paul MN USA 2002. Available at website www.mnproject.org/pdf/haubyfinal3.pdf.
20. SORIA FM, FERRERA CR, ETCHEVERS BJ, ALCANTAR GG, SANTOS J, BORGES GL, PÉREZ PG. Producción de Biofertilizante mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Instituto Tecnológico Agropecuario. 2004:1-18.
21. FIRCO. Biodigestores anaerobicos en granjas porcinas. Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), 2010. http://www.globalmethane.org/documents/events_all_20101208_navarrete_sp.pdf
22. LUNA SA. En Puebla con excremento de cerdo ya se produce energía eléctrica: SAGARPA. Staff Puebla On Line _Jueves, 09 de Diciembre de 2010 http://www.pueblaonline.com.mx/index.php?option=com_k2&view=item&id=7353
23. FIRCO. Cuidado y Aprovechamiento del Agua. Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), 2010. <http://www.firco.gob.mx/saladeprensa/boletines/Paginas/2010-B0016.aspx>.
24. FIRCO. Generalidades del sistema de biodigestion. Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), México 2010.
25. http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex_archivo/edomex_pdf_atlas_sanmateoa.pdf
26. FIRCO. Diagnóstico general de la situación actual de los sistemas de biodigestión en México. Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), 2009. <http://www.rembio.org.mx/2011/Documentos/Publicaciones/C2/diagnostico-nacional-de-biodigestores.pdf>

27. BOTERO R, PRESTON TR. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas, Manual para su instalación, operación y utilización. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV) Cali, Colombia 1987.
28. BALSAM J. Anaerobic digestion of animal wastes: factors to consider. ATTRA–National Sustainable Agriculture Information Service 2006:103-110.
29. EL-MASHAD HM, ZEEMAN G, VAN LOON WKP, BOT GPA, LETTINGA G. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. Bioresource Technology 2004;95:191-201.
30. LANSING S, BOTERO R, MARTIN JF. Waste treatment and biogas quality in small agricultural digester. Bioresource Technology 2008;99:5881-5890.
31. ABRAHAM RE, RAMACHANDRA S, RAMALINGAM V. Biogas: can it be an important source of energy? Environ. Sci. Pollut 2007;14:67–71.
32. Índice de precios del petróleo crudo, precio mensual, precios historicos 2011
<http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=indice-de-precios-del-petroleo-crudo>.
33. SECRETARIA DE ENERGIA. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. México DF: Secretaria de Energia (SENER); Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2006.
34. FIRCO. Utilización y financiamiento de fuentes alternas de energia en el sector agropecuario. Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA); Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Zactecas Zac. 2008.
35. MOLLER HB, SOMMER SG, AHRING BK. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. Biomass and Bioenergy 2004;26:485-495.
36. BATZIAS FA, SIDRAS DK, SPYROU EK. Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method. Renewable Energy 2005;30:1161-1176.

37. IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventors, Chapter 10, Volume 4, Table 10A-7, 2006.
38. HANSEN K, ANGELIDAKE I, AHRING BK. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. *Water Research* 1998;32:5-12.
39. CHAE KJ, JANG A, YIM SK, KIM IS. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yield from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology* 2007;99:1-6.
40. DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. Artículo 36 del Acuerdo por el que se dan a conocer las Reglas de Operación de los Programas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México DF. Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 31 de Diciembre de 2010.
41. <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=21385>
42. BOE K, ANGELIDAKI I. "Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. *Water Research* 2009; 43:166-172.
43. HANSEN K, ANGELIDAKE I, AHRING B. Improving thermophilic anaerobic digestion of swine manure. *Water Research* 1999;33:1805-1810.
44. ALVAREZ R, LIDEN G. The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource Technology* 2008; 99: 7278-7284.