

**Estimación del potencial energético a partir
del metano producido por las aguas residuales
procedentes de la granja porcina de
Zamorano**

**Wendy Katherine Cevallos Piedra
Karen Lisbeth Hidalgo Valencia**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras
Noviembre, 2013**

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

**Estimación del potencial energético a partir
del metano producido por las aguas residuales
procedentes de la granja porcina de
Zamorano**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingenieras en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Wendy Katherine Cevallos Piedra
Karen Lisbeth Hidalgo Valencia**

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2013

Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano

Presentado por:

Wendy Katherine Cevallos Piedra
Karen Lisbeth Hidalgo Valencia

Aprobado:

Victoria Cortés, M.Sc.
Asesora principal

Laura Suazo, Ph.D.
Directora
Departamento de Ambiente y
Desarrollo

Erika Tenorio, M.Sc.
Asesora

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano

**Wendy Katherine Cevallos Piedra
Karen Lisbeth Hidalgo Valencia**

Resumen. La digestión anaerobia es una estrategia de manejo de aguas residuales implementada como alternativa amigable con el ambiente para reducir emisiones a la atmósfera, la contaminación y producir energía y reducir. El presente estudio tiene como objetivo la caracterización cualitativa y cuantitativa de las aguas residuales de la granja porcina de Zamorano. Se realizaron análisis de sólidos totales (ST) y volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO) y nitrógeno total. Se determinó el índice de producción de metano (CH_4) del sustrato mediante el uso de biorreactores en lote montados a una carga orgánica de 0.5 y 3 kg SV/ m^3 . Se estimó el volumen de biogás que se producirá en el biodigestor mediante la simulación en laboratorio con el biorreactor semicontinuo de agitación intermitente. Se caracterizó el efluente después de la digestión anaerobia para evaluar el porcentaje de reducción de contaminación. Se determinó que con una carga orgánica de 0.5 kg SV/ m^3 y un tiempo de retención hidráulica de 20 días se puede obtener hasta un 90% de SV convertidos en CH_4 . Con una relación C:N de 2.9:1, se estimó un índice de producción de metano de 0.37 m^3/kg SV y una productividad de biogás de 0.47 m^3/kg SV. Se evaluó el escenario óptimo de diseño del biodigestor de la granja porcina y el escenario hipotético que utiliza todo el residuo del efluente. El potencial energético anual estimado a partir del metano es 70,838 kW/año que equivale \$ 12,751 y una disminución de emisiones de CO_2 de 24 t/año. La eficiencia de los rectores en remoción de la demanda química de oxígeno fue de 91%.

Palabras clave: Batch, biorreactor, digestión anaerobia, residuo porcino.

Abstract: The anaerobic digestion is considered a strategy for wastewater management and a suitable alternative to reduce greenhouse emissions, generate energy and reduce pollution. This study characterized the wastewater at the Zamorano's swine farm. Total and volatile solids, COD and total nitrogen analyses were performed to the swine effluent. Methane (CH_4) production index of the effluent was estimated with batch bioreactors operated with 0.5 and 3 kg VS/ m^3 of organic load. Potential volume of biogas was calculated using the results at laboratory scale, using a semicontinuous stirrer bioreactor. The organic matter removal after the anaerobic digestion was expressed as percentage of COD reduction. Based on the methane curves, it was determined that with an organic load of 0.5 kg VS/ m^3 , and a hydraulic retention time of 20 days, up to 90% of the VS can be converted into CH_4 . With a C:N ratio of 2.9:1 and 0.5 kg VS/ m^3 organic load applied, a methane production index of 0.37 m^3/kg VS and a biogas productivity of 0.47 m^3/kg VS was achieved. The optimal and hypothetical scenarios required for the biodigestor design, were evaluated considering the daily volume of swine waste. The amount of energy generated by using the methane as fuel was estimated to be 70,838 kW/year, which is equivalent to \$12,751 and to a reduction of 24 t/year carbon dioxide emissions. The COD removal after the anaerobic digestion was 91%.

Keywords: Batch, bioreactor, anaerobic digestion, pig manure.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos	v
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4 CONCLUSIONES.....	21
6 RECOMENDACIONES.....	22
7 LITERATURA CITADA.....	23
8 ANEXOS.....	26

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Caracterización de residuos porcinos de acuerdo a diferentes autores.	3
2. Características del efluente de agua residual de la granja porcina de Zamorano después del separador de sólidos, Honduras, 2013.	11
3. Comparación de la primera fracción del muestreo (15 minutos) con respecto a la segunda fracción del efluente después del separador de sólidos en la granja de cerdos de Zamorano, Honduras, 2013.	13
4. Beneficios económicos que se obtendrán del biodigestor de la granja de cerdos de Zamorano, Honduras.	17
5. Eficiencia de remoción de contaminación (DQO) en el efluente de los reactores batch y semicontinuo de agitación intermitente montados en laboratorio de agua de Zamorano, Honduras, 2013.	18
6. Parámetros establecidos del biodigestor de la granja de cerdos de Zamorano de acuerdo a los escenarios analizados.	18

Figuras	Página
7. Montaje del aparato para cuantificar el metano.	6
8. Esquema del reactor semicontinuo de agitación intermitente.	8
9. Esquema de desplazamiento de agua del aparato colector de gas.	9
10. Producción de metano en biorreactores Batch con carga 0,5 kg SV/ m ³	14
11. Producción de metano reactores batch con carga 3 kg SV/ m ³	15
12. Tiempo de retención hidráulico de acuerdo a la conversión de sólidos volátiles en metano.	16

Anexos	Página
13. Caracterización cualitativa y cuantitativa del muestreo preliminar del agua residual de la granja porcina de Zamorano después del separador de sólidos.	26
14. Características físico químicas de las muestras preliminares del efluente de la granja porcina de Zamorano.	26
15. Características físico químicas del muestreo del efluente de la granja porcina de Zamorano, Honduras, 2013.	27
16. Análisis de laboratorio del agua residual de la granja porcina de Zamorano, UNILAB (2008).	28
17. Sólidos totales y volátiles de una muestra compuesta del efluente de agua residual de la granja porcina de Zamorano antes del separador de sólidos.	29
18. Índice de producción de metano del montaje de biorreactores batch con dos cargas 0.5 y 3 kg SV/m ³	30

19. Cálculos de sólidos volátiles totales de la fosa de acopio (10 m ³) de la granja de cerdos de Zamorano, Honduras, 2013.....	31
20. Distribución y tendencia del pH por muestra de biorreactores batch luego del proceso de biodigestión.	32

INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia es considerada un proceso amigable con el ambiente, en donde la materia orgánica es degradada y se obtiene un producto energético en forma de metano (González *et al.* 2009). El interés por utilizar la digestión anaerobia como una opción del manejo de estiércol se ha expandido rápidamente debido a que en los últimos años incrementaron las emisiones de metano y los impactos ambientales. Existen varios beneficios de este proceso, como por ejemplo: la reducción de las emisiones de metano a la atmósfera, la reducción de la contaminación potencial del agua, la producción de energía renovable, la reducción de costos energéticos al disminuir la cantidad de combustible, entre otros (U.S. Environmental Protection Agency AgSTAR Program 2011).

Un biorreactor es considerado un recipiente en el que suceden reacciones o cambios biológicos con un entorno externo óptimo (Zhonj 2011). En este estudio se utilizaron biorreactores batch (por lote) y semicontinuo de agitación intermitente. En el proceso batch se introduce una carga orgánica específica contenida en un volumen de muestra durante todo el período del experimento, el biorreactor no recibirá materia orgánica adicional a la introducida inicialmente (Keshtkar *et al.* 2001). En un biorreactor semicontinuo el volumen total permanece constante, se introduce una cantidad de materia orgánica (muestra) igual a la extraída luego de un tiempo de retención establecido (Hilbert 2005).

El proceso de digestión en un biorreactor puede verse afectado por diferentes factores que deben ser controlados, como: pH, temperatura, agitación, relación carbono–nitrógeno (C:N) y el tiempo de retención hidráulica. Es recomendable que el pH se encuentre cerca de la neutralidad para que el proceso de digestión se desarrolle de forma satisfactoria (Lay *et al.* 1997). La temperatura afecta el proceso de digestión anaerobia porque los microorganismos que se encargan de la velocidad de la reacción de los procesos biológicos dependen de este factor (El- Mashad *et al.* 2004). Un estudio realizado por Sánchez (2001), señala que el efecto de la temperatura sobre la la digestión anaerobia de los residuos porcícolas en lotes es más estable a 35°C que a temperatura ambiente (16.8-29.5 °C).

En el proceso de la digestión se establece que es importante la mezcla de los fangos de una forma continua (Hernández 2001). Se debe encontrar una agitación óptima para evitar que una agitación excesiva perjudique a este proceso (Hilbert 2003). Mediante la agitación se logra: la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, el mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, la prevención de la formación de costra, la uniformidad la densidad bacteriana y se evita la formación de espacios “muertos” con escasa actividad biológica (Hilbert 2003).

La calidad y la cantidad del biogás depende de la composición del sustrato que se utiliza para la operación del biorreactor. Es importante controlar la cantidad óptima de nutrientes requerida por la población de las bacterias metanogénicas presentes. El carbono representa la fuente de energía y el nitrógeno se utiliza para la formación de nuevas células (FAO 2011).

El tiempo de retención hidráulica en un digestor que opera a régimen estacionario o “discontinuo” es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga” (FAO 2011). En el caso del estiércol porcino se determina un período de retención de 15 a 20 días (Hilbert 2005). El tiempo de retención es considerado un parámetro crítico de diseño y se debe determinar el tiempo en que los microorganismos se demoran en descomponer el sustrato hasta que este sea removido del reactor (Romero 2013).

La carga orgánica es definida como la cantidad de material orgánico que se alimenta a un biodigestor por unidad de volumen diario y se expresa en kilogramos de sólidos volátiles por metro cúbico de biodigestor. Los sólidos volátiles representan la porción de materia de orgánica con el potencial de convertirse en biogás. En un tipo de biodigestor mesofílico la carga orgánica está entre los valores de 2.0 – 3.0 kg SV/m³ (Zupančič *et al.* 2012). Si se tiene una alta cantidad de carga orgánica, se generarán altas producciones de biogás. Sin embargo, una sobrecarga puede dar como resultado la producción excesiva de ácidos orgánicos durante la primera fase de la digestión que provoca una disminución en el pH del biorreactor y posterior un fallo en el proceso de la producción del metano (FAO 2011).

Un parámetro que describe la producción de biogás es la productividad del biogás específica. Esta se define como el volumen de biogás producido por la materia orgánica introducida en el biodigestor, expresada en metros cúbicos de gas por kilogramos de sólidos volátiles (m³/ kg SV). Para las aguas residuales de los cerdos se determina que la productividad de biogás está entre 0.3 a 0.8 m³/ kg SV (Zupančič *et al.* 2012). El material de descarga posee una proporción de nutrientes y fuentes carbonadas disueltas. Este producto se utiliza como fertilizante y es conocido como biol (FAO 2011).

Los efluentes de las granjas porcinas poseen una variabilidad en los parámetros analizados, como lo comprueban los diferentes estudios que utilizaron este sustrato. Es característico que se observen valores altos de sólidos totales, volátiles y demanda química de oxígeno, conocida como DQO (Cuadro 1). Estos parámetros representan materia orgánica en el residuo. Sin embargo esta variabilidad se puede demostrar ya que cada lugar evaluado es diferente. La demanda química de oxígeno constituye un problema al tener que reducir elevadas concentraciones a valores recomendados por la Norma Técnica Nacional de Honduras, para descargas de aguas residuales a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario, correspondiente a 200 mg/L (OPS *et al.* 1997) en términos de DQO.

“La forma más razonable de manejar el agua residual y las excretas de las granjas porcinas es reciclándolas como insumos para las actividades agropecuarias, previo

tratamiento, cuyo objetivo puede ser maximizar la recuperación de nutrientes” (Pérez 2006). El resultado del presente estudio contribuye a la toma de decisiones en la construcción de un modelo de biodigestor, apropiado a las condiciones de operación de la planta de ganado porcino y las características del efluente. Además contribuye a la cultura de Zamorano verde y a los objetivos del programa Eco Zamorano, los cuales buscan la disminución de los impactos ambientales asociados a las actividades desarrolladas dentro del campus. Mediante la digestión anaerobia se proporcionará una alternativa de manejo ambiental eficiente que reduce la concentración de contaminantes, y se generará un combustible gaseoso y un fertilizante orgánico como resultado del proceso.

Cuadro 1. Caracterización de residuos porcinos de acuerdo a diferentes autores.

Parámetro	Unidades	Sánchez <i>et al. 2001</i>	Bonmatí <i>et al. 2003</i>	Pérez 2011	Lin 2013
pH	-	6	7.5	7.78	7.03
Sólidos totales	mg/L	12,100	52,970	-	-
Sólidos volátiles	mg/L	9,500	35,180	-	-
Demanda química de oxígeno	mg/L	19,990	70,590	29,850	29,800
Nitrógeno total	mg/L	740	5,630	3,850	-

Los objetivos del presente estudio son:

- Caracterizar cualitativa y cuantitativamente el agua residual en la granja porcina de Zamorano.
- Determinar el Índice de Producción de Metano (IPM) en el sustrato seleccionado.
- Determinar el volumen diario de biogás producido por unidad de volumen del reactor.
- Evaluar la eficiencia de remoción de DQO verificada en los reactores.
- Evaluar los escenarios para el diseño apropiado para el biodigestor tomando en cuenta la obra gris existente y el potencial energético del residuo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio. La toma de muestras de agua residual se realizó en la granja porcina de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, ubicada a 30 km al sureste de Tegucigalpa, Honduras. La granja porcina es considerada un sistema de explotación intensiva de aproximadamente 900 cerdos distribuidos en las áreas de gestación, engorde 1, engorde 2, maternidad y destete. Además la unidad cuenta con una fosa de acopio y un separador de sólidos.

La fosa de acopio es una estructura que, a través de un sistema de drenaje, colecta el agua de lavado, desperdicio de agua, estiércol, orina y residuos del alimento provenientes de cada corral. Una vez el efluente es extraído de la fosa de acopio pasa al separador de sólidos horizontal que permite el colado de las aguas con un cilindro tamizado de diámetro de partícula 0.86 mm para remover la cerdaza (Arias 2006). Anexo a esta unidad existe un biodigestor en construcción, que cuenta con una estructura de 115 m³. El mismo se construyó con el fin de aprovechar los desechos orgánicos producidos por la unidad porcina mediante una digestión anaerobia. A continuación se detalla los procedimientos para la caracterización cualitativa y cuantitativa del agua residual.

Cuantificación del volumen. Generalmente para cuantificar el volumen total de un efluente se realiza un aforo en la fuente de descarga. Se define el término aforar como la medición del caudal para determinar la disponibilidad del fluido (Manual Hidrometría 2005). En este estudio no fue necesario realizar un aforo mediante el caudal, porque el agua del efluente es recolectada en la fosa de acopio antes del separador de los sólidos. Estudios anteriores señalan que la fosa de acopio tiene una área superficial de 2m × 2m y una profundidad de 2.5 m; cuenta con una capacidad de 10 m³(Arias 2006). Esto se confirmó al medir la altura de la fosa de acopio teniéndose como volumen final 9.88 m³.

Toma de las muestras. La caracterización del agua residual de la granja porcina se efectuó mediante la recolección de muestras diarias, posterior a que el efluente pase por la fosa de acopio y el separador de los sólidos. En un inicio la metodología de la toma de las muestras se definió por la recolección de las mismas en diferente época: lluviosa y seca. No existió un incremento de volumen entre las épocas en la fosa de acopio y mediante el análisis en laboratorio, se determinó que el mayor impacto en la variación de las características estaba asociado al funcionamiento del separador de sólidos y la densidad de los mismos. Para tener representatividad se recolectaron muestras durante el intervalo de funcionamiento del proceso de separación de sólidos, el cual tiene una duración promedio de 30 minutos.

Para fines de la obtención de los datos, se recolectaron dos muestras puntuales diarias, tomadas en intervalos de 15 minutos. Las porciones tomadas durante los primeros 15 min presentaron características comparables entre sí, al igual que las tomadas en el segundo

intervalo de 15 minutos. Sin embargo, existen diferencias apreciables entre las muestras de los dos intervalos ya que la porción tomada durante los primeros 15 minutos presenta características similares entre todas las muestras en cuanto a su composición y contenido de sólidos. La porción tomada durante el segundo intervalo, coincide con el aumento de la producción de cerdaza en el separador de sólidos y es correspondiente a la fracción del agua residual con mayor contenido de materia orgánica dentro de la fosa de acopio. Se realizó la toma de 30 muestras entre agosto y septiembre de 2013, conforme a los parámetros descritos previamente.

Equipo de colección de muestras. Se realizó la toma de muestras en frascos plásticos de un litro. Cada muestra fue codificada, incluyendo la fecha y hora de la recolección. Al momento de la toma de muestras, se registraron datos de pH y temperatura. Posteriormente las muestras fueron caracterizadas en el laboratorio y se realizó el montaje con los biorreactores.

La medición de pH se realizó con la ayuda del Multi-Parameter Test 35 Series. Los sólidos totales y volátiles se analizaron con base en los métodos 2540 B y 2540 E respectivamente (Standard Methods 2005). La demanda química de oxígeno se realizó con el método 8000 y el nitrógeno total con el método 10208 (HACH 2007).

Montaje y arranque de los biorreactores. Se utilizaron dos tipos de biorreactores: batch (por lotes) y semicontinuo de agitación intermitente. Se cuantificó el potencial de producción de metano de un sustrato mediante el uso de biorreactores por lotes. Este potencial se expresó en volumen de metano producido por una cantidad de materia orgánica agregada al proceso. La producción de biogás se cuantificó mediante el montaje del biorreactor semicontinuo de agitación intermitente, que a diferencia del biorreactor por lotes, se alimentó en intervalos regulares y presenta sus resultados en términos del volumen de biogás producido respecto a la materia orgánica que se introduce.

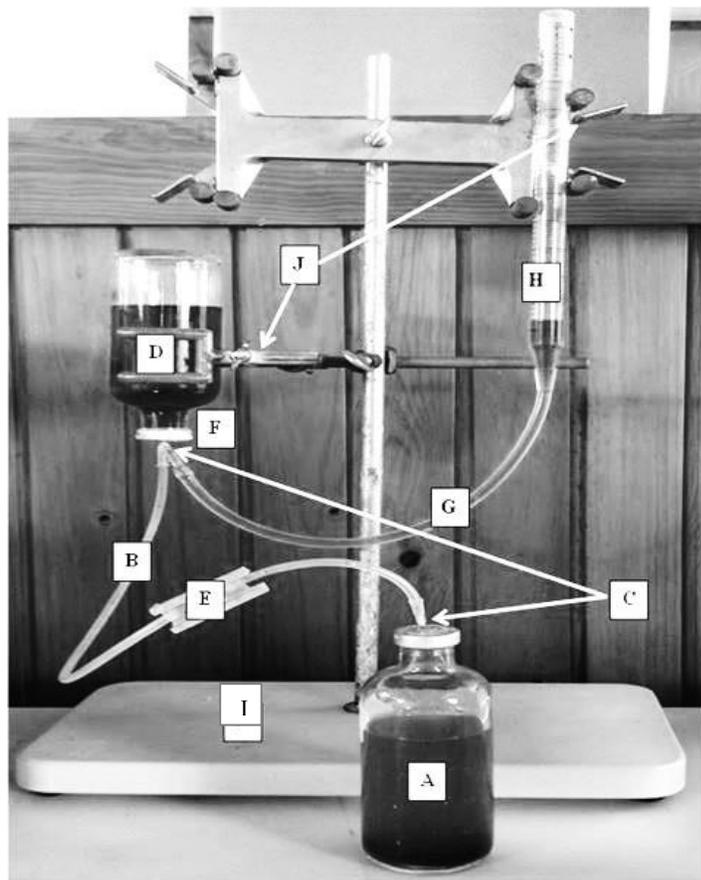
Montaje y determinación del Índice de Producción de Metano en biorreactores por lotes o batch. Los biorreactores batch fueron operados a una temperatura de 35°C (Sánchez 2001). Para una correcta operación se necesita una incubadora que establezca la temperatura, frascos herméticos para asegurar la anaerobiosis e inocular cada biorreactor batch con biol. En este caso se obtuvo biol, que es el efluente de los biodigestores de zona 2 en Zamorano. El biol cumple con la función de inóculo, para que existan organismos metanogénicos requeridos durante la digestión anaerobia. Para el montaje de los biorreactores batch, previamente se caracterizó las muestras, se calculó la porción de muestra y biol que se necesita para un volumen de 200 ml por cada biorreactor. Se seleccionan las cargas orgánicas de acuerdo a la literatura y la composición del residuo. El cálculo del volumen de muestra requerido para la aplicación de las cargas definidas previamente es:

$$\text{Muestra (mL)} = \frac{\text{Volumen del biorreactor mL} \times \text{carga orgánica } \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}}\right)}{\text{Sólidos volátiles de muestra } \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} \quad [1]$$

El cálculo de la Ecuación 1 se estimó en función de la cantidad de los sólidos volátiles que contiene cada muestra y la tasa de carga de 3 y 0.5 kg SV/m³. Adicionalmente al montaje

de la muestra, se incluye el análisis de un blanco bajo las mismas condiciones, sin adición de muestra. Se montaron 10 muestras de las 30 caracterizadas. Las mediciones de cada biorreactor batch se realizaron en un intervalo de tres a cinco días, con el fin de cuantificar la producción del metano.

Este procedimiento consistió en conectar el biorreactor batch de 200 ml al recipiente que contiene la solución de KOH (Figura 1). La solución contiene un indicador llamado rojo de alizarina. Por cada 280.5 g de KOH se agrega 0.1 g. de rojo de alizarina. La producción de metano se registró mediante el desplazamiento del volumen de la solución a la pipeta conectada (Wilkie *et al.* 2004). Al final el resultado de Índice de Producción de Metano se expresa en $\text{m}^3 / \text{kg SV}$.



A: Reactor Batch
B: Conexión de gas
C: Terminaciones de los recipientes
D: Recipiente de solución de KOH
E: Abrazadera de conexión de gas
F: Conector
G: Conexión de KOH
H: Pipeta, medidor de solución KOH
I: Soporte Universal
J: Pinzas

Figura 1. Montaje del aparato para cuantificar el metano.
Nota. Adaptado de Wilkie *et al.* 2004

Determinación del volumen total de biogás producido con el biorreactor semicontinuo de agitación intermitente. Para determinar el volumen total de biogás se construyó el biorreactor semicontinuo de agitación intermitente llamado “Bordeaux stirrer” de acuerdo a las especificaciones de un estudio realizado en la Universidad de Florida (Wilkie *et al.* 2004). El reactor consiste en un recipiente de 4 L, que opera con motor de 60 RPM. Se conectó una barra agitadora para garantizar una mezcla continua, con un intervalo de operación de 30 minutos controlado mediante un temporizador (Figura 2).

En este biorreactor el reservorio con la solución que produce biogás se conectó a un contenedor de vidrio de 9.5 L y este se conectó a un reservorio de plástico de 10 L. Se utilizó agua como solución para cuantificar la producción de biogás por desplazamiento de volumen. El gas acumulado en el reactor semicontinuo de agitación intermitente empuja el agua del contenedor de 9.5 L hacia el reservorio de agua de plástico de 10 L (Figura 3) Los datos se registraron de acuerdo al desplazamiento diario de agua del contenedor de vidrio; este desplazamiento determinó la cantidad de biogás (Wilkie *et al.* 2004). Los resultados son expresados en litros de biogás desplazados por la cantidad de muestra alimentada. El volumen de biogás se estimó de acuerdo al desplazamiento diario de agua, y al final el resultado se expresa en $\text{m}^3 / \text{kg SV}$.

Las cargas que se consideraron para alimentar este biorreactor fueron de 0.5 y 1.5 kg SV/ m^3 . Para cuantificar el volumen de muestra con el que se operó a alimentarlo con una determinada cantidad de muestra cuyo volumen se calculó de acuerdo a la ecuación 1 que se utilizó al montar el biorreactor batch.

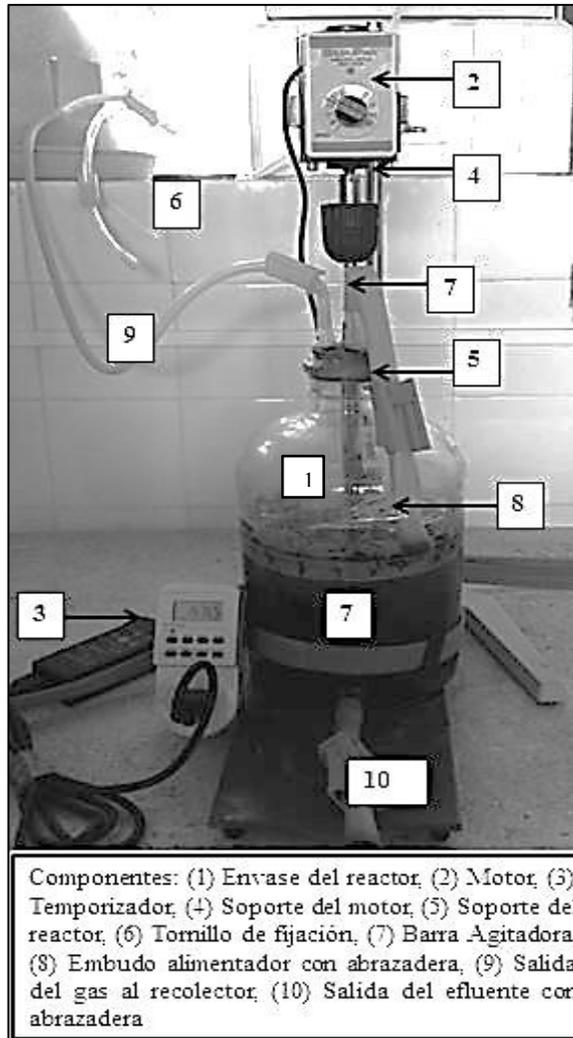


Figura 2. Esquema del reactor semicontinuo de agitación intermitente.
Nota. Adaptado de Wilkie *et al.* 2004



Componentes: (1) Colector de gas (9.5 L), (2) Reservorio de agua (10 L), (3) Conexión de gas desde el bioreactor, (4) Descarga del gas con abrazadera, (5) Conexión de drenaje con abrazadera, (6) Entrada de gas, (7) Tapa de ventilación, (8) Soporte de colector de gas, (9) Escala graduada; (10) Carga de presión dinámica y (11) Conexión de desplazamiento.

Figura 3. Esquema de desplazamiento de agua del aparato colector de gas.

Nota: Adaptado de Wilkie *et al.* 2004

Evaluación de la eficiencia de la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) verificada en los reactores. La composición orgánica del agua residual produce un proceso de oxidación expresado en cantidad de oxígeno requerido para oxidar (DQO). Se cuantificó la DQO del biol que sale de los biorreactores batch y semicontinuo de agitación intermitente, para luego comparar con la DQO de las muestras iniciales del efluente de aguas residuales de la granja de cerdos. Se obtuvo la eficiencia de la reducción basado en la Ecuación 2.

$$\text{Eficiencia de reducción (\%)} = \frac{S-E}{E} \times 100 \quad [2]$$

En donde:

S: Salida

E: Entrada

Evaluación de los escenarios para el diseño apropiado con la obra gris existente y el potencial energético del residuo. Se determinaron dos escenarios para el desarrollo del dimensionamiento del biodigestor que son: a) Escenario óptimo, se aprovechó la estructura del biodigestor de 115 m³ realizada en la granja porcina de Zamorano. Además se aplica los valores de los parámetros desarrollados en laboratorio como son el tiempo de retención hidráulica, la carga orgánica óptima aplicada y la producción de biogás. b) Escenario hipotético se planteó el posible biodigestor, se utiliza todo el residuo del efluente de la granja porcina.

Para el dimensionamiento del biodigestor se tomaron en cuenta diferentes parámetros que son claves para su desempeño. Entre ellos se encuentran: el tiempo de retención hidráulica, el volumen diario alimentado, el volumen total del biodigestor, la carga orgánica del biodigestor, los sólidos volátiles, la relación C:N, el pH y la temperatura.

Análisis Estadísticos. Se analizó mediante el programa estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), para determinar si el efluente de la granja porcina es homogéneo en sus características cualitativas (sólidos totales y volátiles) en el punto de descarga; es decir después del separador de sólidos. Se empleó 30 muestras y se utilizó la prueba de Kolmogórov Smirnov (K-S) que corresponde a una prueba no paramétrica para determinar la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí. Seguidamente de la prueba de U de Mann Whitney para comparar los promedios de las muestras en dos tiempos diferentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización cualitativa y cuantitativa del agua residual de la granja porcina de Zamorano después del separador de sólidos. La caracterización de las muestras generó resultados de los parámetros que se deben tomar en cuenta para un correcto manejo y funcionamiento de un biodigestor (Cuadro 2). Existe gran variabilidad en las muestras del efluente de cerdos. Se comprueba que estas características son propias del tipo de agua residual, actividades propias de la granja y estratificación del efluente en la fosa de acopio antes de que llegue al separador de sólidos.

Cuadro 2. Características del efluente de agua residual de la granja porcina de Zamorano después del separador de sólidos, Honduras, 2013.

Parámetro	Unidad	N	Promedio	Valores
pH	-	30	7.62	6.81 - 8.40
Temperatura	°C	30	24.63	23.70 - 25.80
Sólidos totales (ST)	mg/L	30	9,785.50	1,778.80 - 21,603.20
Sólidos volátiles (SV)	mg/L	30	7,878.48	1,332.80 - 18,787.60
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	15	14,396.87	7,100.00 - 30,450.00
Nitrógeno total (NT)	mg/L	10	2,058.40	1,332.80 - 18,787.60

pH. El pH es un parámetro que se midió *in situ* después de que pase por el separador de sólidos. Este se encuentra en un con valores entre 6.81 – 8.40. Determinando que el rango adecuado para una apropiada biodigestión no debe bajar de 6 o subir de 8 (FAO 2011) y comparando con estudios anteriores que obtuvieron valores entre 7.5 – 7.8 (Riaño *et al.* 2011; Bonmatí *et al.* 2003 y Pérez 2011) se comprueba que existen valores adecuados. Sin embargo para controlar que el pH esté en los valores óptimos se necesita monitorear el proceso de digestión anaerobio.

Temperatura. La temperatura es otro parámetro que se tomó *in situ* al momento de recolección de muestra, determinándose que presentó los valores obtenidos están entre 23.70 – 25.80. Para que se del proceso de biodigestión se necesita que esta temperatura se eleve a 35 °C, que corresponde el valor óptimo de operación dentro de las características mesofílicas.

Sólidos totales. Al realizar el análisis físico-químico del muestreo diario, se encontró una amplia variabilidad. La media es de 9,785.50 mg/L, si se compara con los análisis del laboratorio UNILAB realizados en 2008 que presentó una cantidad de sólidos totales de 4,548.53 mg/L, se puede determinar que existe mayor concentración de sólidos totales en la actualidad. Después de recopilar los resultados obtenidos en las muestras recolectadas entre los meses de junio a septiembre de 2013, se puede concluir que los sólidos totales varían durante el tiempo en que el separador de sólidos funciona. Además se determinó que existe mayor cantidad de sólidos totales durante la primera fracción del muestreo (primeros 15 minutos de operación del separador de sólidos) en comparación con la segunda.

Para determinar cuál es la cantidad de sólidos totales del efluente antes de que pase a la fosa de acopio y el separador de sólidos, se realizó una muestra compuesta durante una hora. El resultado tuvo en promedio 12,816 mg/L de sólidos totales. El valor es similar al análisis del laboratorio UNILAB (2008) que tenía como promedio 12,082.50 mg/L. Si se comparan los sólidos totales antes del separador de sólidos con los que salen después del separador de sólidos, se puede determinar que el efluente puede alcanzar valores con una concentración mayor o igual al efluente después del separador. Sin embargo, el volumen que aporta esta concentración es menor por la separación de la cerdaza.

Sólidos volátiles. Los sólidos volátiles presentan también variabilidad con una media de 7,878.48 mg/L. Este valor es mayor si se compara con el análisis realizado en el laboratorio UNILAB (2008) de 3,100 mg/L. Se realizó el análisis en laboratorio de los sólidos volátiles del efluente de la granja antes de que llegue al separador de sólidos. En la muestra compuesta se presentó una concentración promedio de 9,568 mg/L. Este valor es similar al compararse con el análisis del laboratorio UNILAB (2008) que se obtuvo 9,682.50 mg/L.

Al igual que los sólidos totales se encontró valores iguales o mayores en el efluente después del separador de sólidos en relación al efluente antes del separador de sólidos. Por esta razón se determinó que se puede aportar al afluente del biodigestor valores mayores de sólidos volátiles, pero con menor volumen que en promedio es 1.4 m³. Para comprobar este resultado se realizó la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney (Cuadro 3). Se demostró que existe diferencia significativa entre los promedios de la primera porción del efluente; es decir los primeros 15 minutos de funcionamiento del separador de sólidos generan un efluente poco concentrado en sólidos totales y volátiles en comparación con la segunda porción de 15 minutos.

Cuadro 3. Comparación de la primera fracción del muestreo (15 minutos) con respecto a la segunda fracción del efluente después del separador de sólidos en la granja de cerdos de Zamorano, Honduras, 2013.

Prueba Estadística	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles	pH	Temperatura
U de Mann-Whitney	17.00	14.00	102.00	77.50
Z	-3.84	-3.97	-0.13	-1.20
Sig. asintót. (bilateral)	0.00*	0.00*	0.90	0.23

*Significativamente diferentes $P < 0.05$

Demanda química de oxígeno (DQO). Los valores están entre 7,100 a 30,450 mg/L, para las características propias del efluente de cerdos y también que las muestras son sintéticas sin ninguna otra intervención en el método. Se determina que los valores pueden tener una desviación estándar de 10% en el valor actual (APHA 2005). La media que posee el estudio es de 14,396.87 mg/L, este valor es menor al compararse con otros estudios, como por ejemplo: 25,300 mg/L (Riaño *et al.* 2011), 70,590 mg/L (Bonmatí *et al.* 2003) y 29,850 mg/L (Pérez 2011). Con estos valores de DQO se determina que es necesario el uso de un biodigestor para disminuir la carga orgánica y posteriormente buscar tratamientos secundarios que permitan cumplir con la Norma Técnica Nacional de Honduras, para descarga de aguas residuales a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario.

Nitrógeno Total. El agua residual en la granja porcina de cerdos se encuentra con valores entre 985 a 3065 mg/L. Estos datos comparados con los resultados del laboratorio de UNILAB (2008) que tiene 657.89 mg/L, se encuentran con un valor mayor. Al compararse con la muestra compuesta diaria del mismo laboratorio 1,125.36 mg/L, se determina que se encuentran valores altos como los de un efluente fresco, sin ninguna separación de sólidos. Al comparar con otros estudios, se encontró que el efluente de Zamorano está sobre el valor registrado de 740 mg/L (Sánchez *et al.* 2001) y si se compara con los valores de 5,630 mg/L (Bonmatí 2003) y 3,850 mg/L (Pérez 2011) son menores, aunque estos dos últimos efluentes de cerdos son con un material crudo y fresco.

Determinación del Índice de Producción de Metano (IPM) en los reactores por lote. Se cuantificó el índice de producción de metano de los reactores batch, que fueron montados con cargas orgánicas conocidas: 0,5 y 3 kg SV/ m³. El metano acumulado a lo largo de los días permite conocer la cantidad total de metano producido por las muestras y permite identificar el tiempo de retención hidráulico necesario para que esto suceda (Figuras 4 y 5).

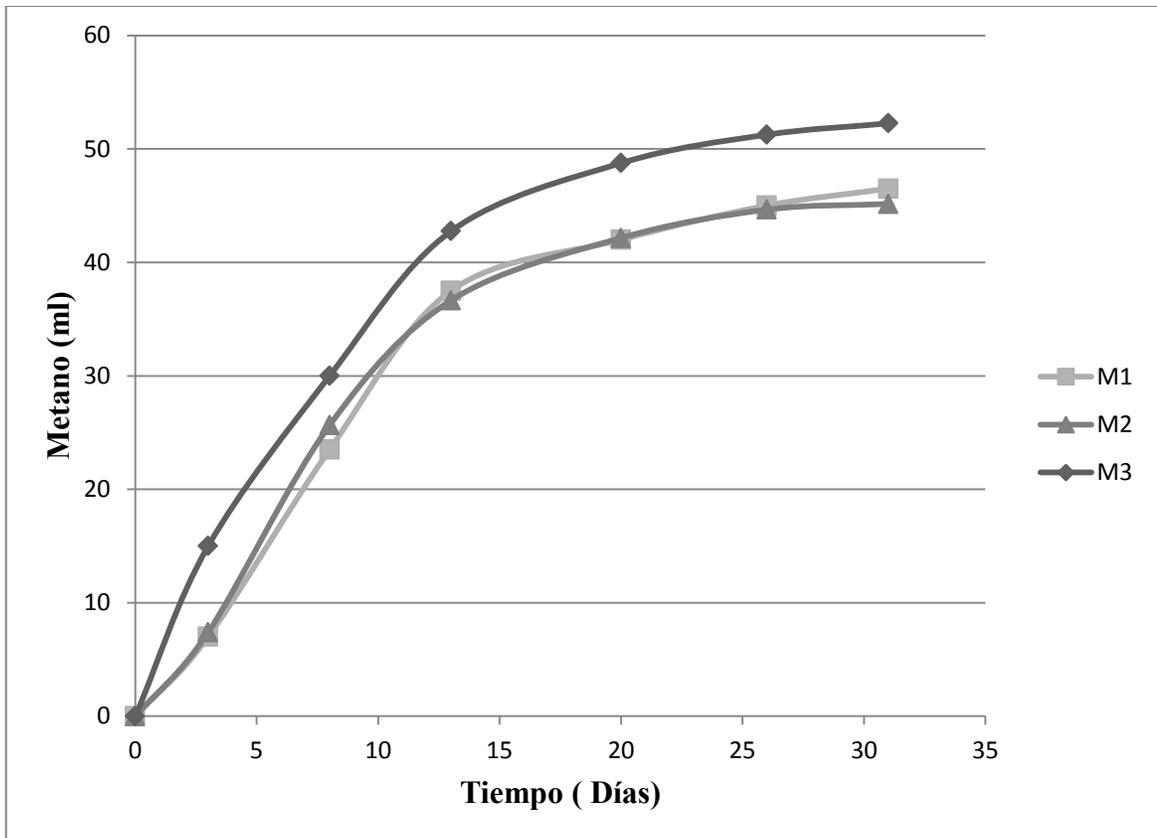


Figura 4. Producción de metano en biorreactores Batch con carga 0,5 kg SV/ m³.

Se realizó el montaje de tres biorreactores batch en las mismas condiciones con una carga de 0.5 kg SV/m³, para observar el comportamiento de la producción de metano. El montaje se realizó de acuerdo a la cantidad de sólidos volátiles que posee cada muestra. La actividad de las bacterias mesofílicas empiezan a producir metano a partir del tercer día, con un aumento progresivo después del quinto día (Figura 4). Al alcanzar el día 13 de digestión, obtenemos el 80% del total de metano producido.

El Índice de Producción de Metano (IPM) para cada biorreactor se calculó basado en la Ecuación 3. Este índice es la relación entre el total de metano acumulado y la cantidad de materia orgánica acumulada en términos de sólidos volátiles. El IPM promedio para la carga orgánica de 0.5 kg SV/m³ fue de 0.35 m³/kg SV.

$$IPM = \frac{\sum_{d=1}^n CH_4 \text{ acumulado (m}^3\text{)}}{\sum_{d=1}^n SV \text{ (kg)}} \quad [3]$$

En donde:

n: Tiempo de incubación que lleva la producción máxima de CH₄ que se determina en el momento en que finaliza la producción de CH₄ en los biorreactores.

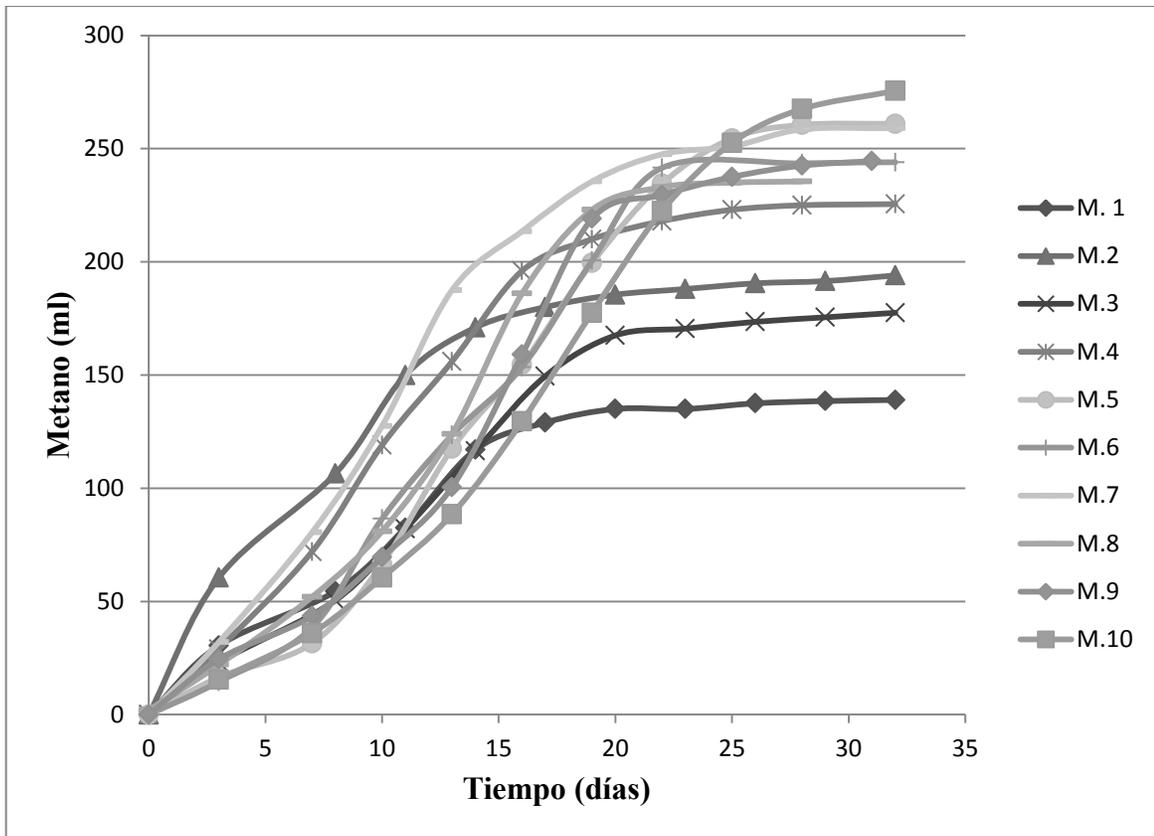


Figura 5. Producción de metano reactores batch con carga 3 kg SV/ m³.

Se realizó el montaje de diez reactores batch con una carga de 3 kg SV/m³ en las mismas condiciones. Las curvas establecidas de estos reactores indican el comportamiento de las bacterias mesofílicas. A partir del tercer día empieza una actividad con un incremento progresivo de producción de metano a partir del quinto día (Figura 5). Se observó variabilidad en las curvas de las mismas cargas debido a que cada muestra tiene características propias y fueron recolectadas en diferentes días. Esto se comprueba con la variabilidad en la composición y la caracterización realizada en laboratorio propio de aguas residuales de cerdos (Cuadro 2).

Se determinó que la velocidad de generar metano fue menor en los batch cargados con 3 kg SV/m³ en comparación con los batch montados a una carga de 0.5 kg SV/m³. Esto se debe porque en el caso de los batch montados a 0.5 kg SV/m³ existe mayor cantidad de organismos metanogénicos y menor cantidad de materia orgánica y sólidos volátiles para digerir y que puedan ser transformados en metano. Mientras en los biorreactores batch a 3 kg SV/m³ existe una digestión de diferentes compuestos con mayor cantidad de materia orgánica. Se calculó el promedio de índice de producción de metano con el mismo procedimiento que se realizó para el experimento a una carga de 0.5 kg SV/m³ explicado anteriormente. El resultado obtenido fue de 0.38 m³/kg SV.

A partir de la primera medición que fue al tercer día ya se pudo observar un incremento notable en las producciones de metano, teniendo 80% de producción de metano el día 18.

Decae totalmente la producción de metano a partir del día 22 donde 10% que faltó de producir tiene una duración de nueve días para terminar su producción total. En los dos experimentos se muestra que el agotamiento de los sólidos volátiles en un 90% ocurre a los 20 días. El tiempo de retención para este tipo de sustrato se estimó que es de 20 a 30 días (Figura 6).

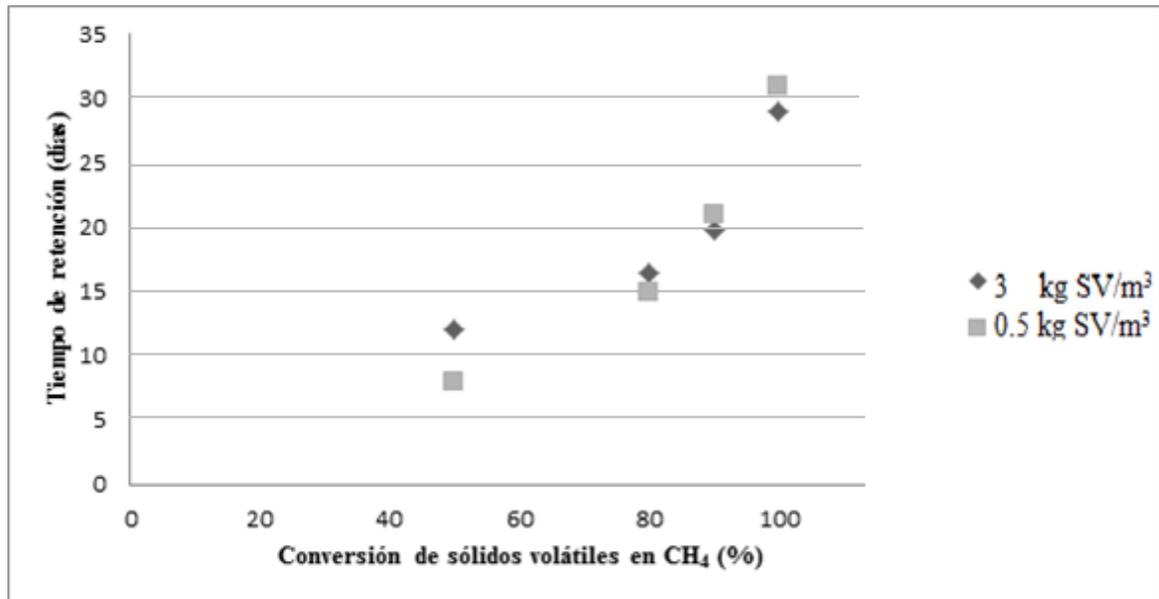


Figura 6. Tiempo de retención hidráulico de acuerdo a la conversión de sólidos volátiles en metano

Determinación del volumen total de biogás producido con el biorreactor semicontinuo de agitación intermitente El biorreactor “Bordeaux stirrer” de 3 L fue alimentado de muestra fresca obtenida del efluente de la granja porcina. La carga orgánica de alimentación fue de 0.50 kg SV/ m³ que generó diariamente 0.7 L de biogás. Con esta cifra de producción diaria de biogás se extrapola que la granja generará un total de 26.83 m³ biogás diariamente con el diseño de la obra ya existente en dicha unidad de 115 m³. Al utilizar el contenido energético del biogás de 6.80 kWh se traduce a un total de 66,592.06 kW/año generados a partir del biogás. La valoración económica de esta energía se traduce en \$11,986.57/año como beneficio (Cuadro 4). Si tomamos en cuenta la que la granja demanda mensualmente 1,702 kW y la oferta de esta energía limpia cubriría mensualmente 1,664.80 kW considerando una eficiencia de conversión a energía eléctrica de 0.30%.

En el presente estudio determinó que la productividad específica del biogás fue de 0.47 m³/kg SV y del metano de 0.31 m³/kg SV. El porcentaje de metano presente en el biogás basado en las mediciones realizadas durante todo el estudio fue de 66%. Este resultado se encuentra en los rangos óptimos de composición, que se encuentra entre el 55 a 70% del total del biogás (Deublein *et al.* 2008).

Actualmente el efluente de la granja porcina se dirige a la laguna estabilización que representa una estructura de almacenamiento de aguas residuales abiertas al sol y aire cuyo fin es lograr un tratamiento a través de procesos naturales. Sin embargo, la utilización de estos tratamientos representa una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero. Por esto si se adopta el sistema de digestión anaerobia se dejará de emitir estos gases por la captura de los mismos en el sistema. La cantidad de CO₂ que se deja de emitir es por cada kW/h es equivalente a: 0.34 kg CO₂ (Kumar *et al.* 2000). Y el costo de la tonelada de CO₂ oscila entre 9.30 \$ (Akbulut 2012). Registrándose un total de 22.64 t/año CO₂ que se dejan de emitir a la atmosfera si se hace uso del sistema de digestión anaerobia (Cuadro 4).

Cuadro 4. Beneficios económicos que se obtendrán del biodigestor de la granja de cerdos de Zamorano, Honduras. .

Parámetro	Unidades	Biogás	Metano
Carga orgánica	kg SV/m ³	0.50	0.50
Productividad específica	m ³ /kg SV	0.47	0.37
Volumen/día	m ³	26.83	20.03
Volumen/año	m ³	9,792.95	7,126.59
Contenido energético	kWh	6.80	9.94
Energía producida	kW/año	66,592.06	70,838.29
Valoración económica de energía	\$/año	11,986.57	12,750.89
Disminución equivalente de emisión de CO ₂	kg/año	22,641.30	24,085.02
Disminución equivalente de emisión de CO ₂	t/año	22.64	24.09

Evaluar la eficiencia de remoción de DQO verificada en los reactores. Se analizó el efluente de los biorreactores batch y semicontinuo de agitación intermitente al final del proceso de biodigestión. Este análisis se realizó un vez terminado el consumo de materia orgánica presente y concluido el tiempo de retención hidráulica. Los análisis se efectuaron en términos del pH, los sólidos totales (ST), los sólidos volátiles (SV) y la demanda química de oxígeno (DQO). Con los resultados obtenidos se determinó que existe una reducción en los cuatro parámetros mencionados.

En el caso de los dos biorreactores, batch y semicontinuo de agitación intermitente, las concentraciones de DQO, ST y SV presentadas en el análisis mostraron valores mayores en la entrada en comparación con la salida del sistema. Se encontró una reducción promedio en los biorreactores batch de DQO 92.02%, ST 79.57% y SV de 92.13% ; y en el biorreactor semicontinuo de agitación intermitente una reducción de DQO 87.02%, ST 96.67% y SV de 91.07%. Estos resultados resumen la alta eficiencia que tiene el proceso de digestión en los biorreactores (Cuadro 5). A medida que la producción de biogás sea mayor, mayor serán los porcentajes de remoción de la materia orgánica presente en el sustrato (Osorio *et al.* 2007).

Cuadro 5. Eficiencia de remoción de contaminación (DQO) en el efluente de los reactores batch y semicontinuo de agitación intermitente montados en laboratorio de agua de Zamorano, Honduras, 2013.

Parámetro	Batch			Semicontinuo de agitación intermitente		
	Promedio Inicial (mg/L)	Promedio final (mg/L)	Reducción (%)	Promedio Inicial (mg/L)	Promedio final (mg/L)	Reducción (%)
Sólidos totales (ST)	12,372.06	2,527.60	79.57	12,372.06	1,605.33	87.02
Sólidos volátiles (SV)	10,219.64	804.00	92.13	10,219.64	340.40	96.67
Demanda química de oxígeno (DQO)	13,630.30	1,087.80	92.02	13,630.30	1,216.67	91.07

Evaluación de los escenarios para el diseño apropiado tomando en cuenta la obra gris existente y el potencial energético del residuo. El biodigestor que se establecerá en la granja de cerdos en Zamorano se dimensionó en dos escenarios. El escenario óptimo que considera la obra gris realizada en el lugar y los resultados de la caracterización del efluente de la granja realizados en laboratorio. El escenario hipotético que considera utilizar todo el efluente que produce la granja de cerdos (10 m^3) y el tiempo de retención hidráulico recomendado de 20 días (Cuadro 6).

Cuadro 6. Parámetros establecidos del biodigestor de la granja de cerdos de Zamorano de acuerdo a los escenarios analizados.

Parámetro	Unidad	Escenario óptimo	Escenario hipotético
pH	-	7.20 - 7.36	7.20 - 7.36
Temperatura	°C	32.2	32.2
Tiempo de retención hidráulica	días	12	20
Sólidos volátiles	kg SV	57.22	57.22
Carga orgánica	kg SV/m ³	0.50	0.29
Volumen alimentación	m ³ /día	10	10
Volumen total	m ³	115	200
Relación C:N	-	2.9:1	2.9:1

Volumen total del biodigestor. Se determinó el volumen del biodigestor en el escenario óptimo como el volumen de la estructura del biodigestor realizado en la granja de cerdos para aprovechar la inversión. En el escenario hipotético se determinó el volumen total del biodigestor basado en el aprovechamiento total del efluente de la granja de cerdos, con un volumen de alimentación diaria de 10 m^3 .

Temperatura. La temperatura establecida en el laboratorio se controla mediante una banda de calor alrededor del biorreactor semicontinuo. De acuerdo a esto se obtuvo valores entre 33 a 36.6 °C. Se debe tomar en cuenta que en la simulación se controla la temperatura y los diversos factores que afectan el proceso de digestión anaerobia. Si se quiere analizar las condiciones en el ambiente externo, se tomó como referencia que en los biodigestores de Zona 2 en Zamorano se tiene una temperatura promedio de 32.2 °C y se produce biogás. Por lo que si se instala el biodigestor en la granja de cerdos se puede tener producción de biogás en condiciones similares.

Tiempo de retención hidráulica (TRH). En el dimensionamiento del biodigestor se estableció el tiempo de retención de acuerdo a la conversión de sólidos volátiles en metano (Figura 6), basado en las curvas de acumulación de metano (Figuras 4 y 5). Se consideró que para obtener 100% de producción de metano se necesitan 31 días y para un 90% de producción de metano se tiene un tiempo de retención de 20 días. Se concluyó que es recomendable utilizar el tiempo de retención de 20 días, ya que el incrementar 10% de metano ocasionará un incremento considerable en el volumen del biodigestor de aproximadamente 100 m³.

En el caso en que se quisiera aprovechar todo el efluente de la fosa de acopio con la estructura realizada en la granja de cerdos, se necesita alimentar con un volumen menor a 10 m³. Para tener 20 días de tiempo de retención se debe alimentar con 5.75 m³. Si se considera el escenario óptimo se tendrá un tiempo de retención de 12 días, lo que significa que se aprovechará solo 50% del metano producido por el biodigestor. Sin embargo, al disminuir el volumen diario alimentado, implica que se disminuirá también la cantidad de sólidos volátiles a 36.4 kg SV y la carga orgánica a 0.32 kg SV/m³.

Sólidos volátiles. De acuerdo a esta estratificación se determinó que en total se tiene 57.22 kg SV totales que aporta todo el volumen de la fosa de acopio. Con la estratificación en la fosa de acopio se tiene que 86% de la misma tiene una concentración de sólidos volátiles de 4,898 mg/L y 14% tiene una elevada concentración de 10,767 mg/L.

Volumen de alimentación. El volumen de alimentación en los dos escenarios fue de 10 m³ para tener un aprovechamiento de todo el efluente de la fosa de acopio. Sin embargo, si en el escenario óptimo que utiliza la estructura del biodigestor en la granja de cerdos se desea tener un tiempo de retención de 20 días con una carga orgánica mayor, se debe disminuir el volumen de alimentación y adicionar materia orgánica.

Carga orgánica. Se tendrá una concentración baja de sólidos volátiles en el biodigestor, de acuerdo a las características del efluente y la dilución que tendrá el mismo en el volumen de 115 m³. Se puede determinar que en los dos escenarios la carga orgánica es de 0.5 y 0.29 kg SV/m³ respectivamente. Con estas características del biodigestor se puede elevar las cargas al incrementar materia orgánica.

Relación C:N. La relación óptima en el efluente de cerdos es de 25:1. Sin embargo, no se está cumpliendo con este parámetro. Con una relación baja de 2.9:1 se determina que existe una alta cantidad de nitrógeno y la carencia de fuentes de carbono. Es recomendable que para mejorar la eficiencia se debe incrementar la cantidad de materia orgánica en forma de carbono como por ejemplo los residuos del comedor, elote o rastrojo.

CONCLUSIONES

- El efluente de cerdos de la granja de cerdos en Zamorano presenta variabilidad en todos los parámetros analizados en laboratorio. Esto se asocia a las características propias del efluente, las actividades de la granja y el pretratamiento aplicado por el separador de sólidos. Estos factores deben ser tomados en cuenta al planificar el monitoreo en la zona ya que se encuentran diferencias significativas en la composición del efluente debido al fraccionamiento del mismo en la fosa de acopio.
- Luego de aplicar cargas orgánicas diferentes para la determinación de Índice de Producción de Metano se obtuvo un valor promedio de $0.37 \pm 0.02 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. Esto indica que la productividad de metano está asociada a las características del residuo y no a la carga orgánica introducida al digester. Lo anterior también es indicador del potencial del residuo para la producción de metano como fuente energética.
- Cada metro cúbico de líquido en el reactor bajo las condiciones de operación establecidas (temperatura, carga orgánica, tiempo de retención, volumen del biodigestor) producirá 0.23 m^3 de biogás. Este valor se utiliza para la proyección de biogás en el biodigestor establecido que operará bajo condiciones controladas.
- Las curvas de metano acumulado nos indican que el tiempo de retención hidráulico recomendable es de 20 días para la conversión de 90% de sólidos volátiles presentes en el residuo en metano. Si se desea incrementar a 100% la producción de metano el tiempo de retención es a los 31 días, por lo que se incrementará aproximadamente 100 m^3 en el volumen del biodigestor.
- Si se aprovecha todo el efluente producido en la granja de cerdos (10 m^3) y utiliza la obra gris construida para la operación del digester, se tendría un tiempo de retención de 12 días, generándose 50% de la producción de metano potencial. Adicionalmente, no se obtendrán las eficiencias de remoción de DQO y sólidos esperadas en este tipo de tratamientos.
- A pesar de obtenerse eficiencias de remoción de ST, SV y DQO de 87%, 97% y 91% respectivamente en los diferentes reactores, el efluente de salida requeriría de un tratamiento posterior previo a su descarga a cuerpos receptores.

RECOMENDACIONES

- Reducir el consumo de agua en las actividades de ganado porcino. Esto conducirá a un menor volumen de residuo generado y un mejor aprovechamiento de la obra gris construida para la operación del biodigestor.
- Incrementar la producción de biogás mediante el aumento de la carga orgánica a través de la adición de fuentes de carbono externas. Esta actividad mejorará la productividad de biogás y la relación C:N.
- Mejorar las condiciones iniciales de la homogeneidad en el residuo que alimenta el digestor. Se puede acoplar un dispositivo de mezcla del efluente recolectado en la fosa de acopio, por ejemplo una bomba de recirculación. Esto impactaría en el pretratamiento existente.

LITERATURA CITADA

Akbulut, A. 2012. Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study. *Energy* 44(1):381-390.

APHA (American Public Health Association). 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20a ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1,325 p.

Arias, J. 2006. Manejo de aguas residuales y excretas en la producción de cerdos en Zamorano, Honduras. Tesis Ing. Agr. Tegucigalpa, Honduras, Zamorano. 15p.

Bonmatí, A. y X. Flotats. 2003. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre-or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion. *Waste management* 23(3):261-272.

Comisión Nacional de Energía (s.f). Biogás (en línea). Consultado: 18 de Octubre del 2013. Disponible en: <http://www.cne.cl/energias/biocombustibles/tipos-de-energia/337-biogas>.

Deublein, D. y A. Steinhauser. 2008. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Wiley.vch. Germany. 450 p.

El-Mashad, H., G. Zeeman, W, van Loon. y G. Bot. 2004. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresource Technology* 95(2):191-201.

Ministerio de Agricultura de Perú. 2005. Manual de Hidrometría. Convenio Marco de Cooperación Interinstitucional INERA-UCPSI. 2p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. Manual de Biogás. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. Santiago de Chile. 120 p.

González, C. y P. García. 2009. Impact of substrate to inoculum ratio in anaerobic digestion of swine slurry. *Biomass and Bioenergy* 33 (8):1065-1069.

HACH. 2007. DR 2800 Spectrophotometer. Procedures Manual. Método 8000. 2 ed. Germany. p 107-114.

HACH. 2007. DR 2800 Spectrophotometer. Procedures Manual. Método 10208. 2 ed. Germany. p 289-326.

Hernández, A. 2001. Depuración y Desinfección de Aguas Residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 5 ed. España. 935 p.

Hilbert, J. 2003. Manual para la Producción de Biogás. Instituto de Ingeniería Rural INTA – Catelar. Morón, Argentina. 54 p.

Keshtkar, A., H. Ghaforian, G. Abolhamd, y Meyssami, B. 2001. Dynamic simulation of cyclic batch anaerobic digestion of cattle manure. *Bioresource Technology* 80(1):9-17.

Kumar, M., S. Humar y M. Poonia. 2000. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide reduction through the application of biogas technology. *Environmental Health* 42(3): 117-120.

Lay, J., Y. Li y T. Noike. 1997. Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research* 31(6):1518-1524.

Lin, L., W, Chunli., L, Xiang., L, Duu., L, Zhongfang., Z, Yi. y T, Joo. 2013. Effect of initial pH on mesophilic hydrolysis and acidification of swine manure. *Bioresource Technology* (136):302-308.

Moncayo, G. 2003. La producción y el aprovechamiento del Biogás. Zamorano, Honduras. 16 p.

OPS/OMS (Organización Panamericana de la Salud). 1997. Normas Técnicas de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores y alcantarillado sanitario (en línea).

Consultado: 16 de Mayo del 2013. Disponible en:

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/cd-cagua/normas/lac/11.HON/01.norma.pdf>.

Osorio, J., H. Ciro, H. González. 2007. Evaluación de un sistema de Biodigestión en serie para climas fríos. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 60(2):4145-4162.

Pérez, R. 2006. Granjas Porcinas y Medio Ambiente: Contaminación del Agua en La Piedad, Michoacán (en línea). Consultado 16 de Mayo del 2013. Disponible en: <http://ru.iiec.unam.mx/1960/1/04%20GranjasPorcinas.pdf>.

Pérez, M., C, León., M, Benavente, M, García. 2011. Solids and nutrient removal from flushed swine manure using polyacrylamides. *Journal of Environmental Management* 93(1):67-70.

Riaño, B., B. Molinuevo y M. García. 2011. Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine manure with winery wastewater. *Bioresource Technology* 102(5):4131-4136.

Romero, M., L, Fdez., C, Álvarez y L, Romero. 2013. Effect of HRT on hydrogen production and organic matter solubilization in acidogenic anaerobic digestion of OFMSW. *Chemical Engineering Journal* (219):443-449.

Sánchez, E., R. Borja, P. Weiland, L. Travieso y A. Martín. 2001. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. *Process Biochemistry* 37(5):483-489.

U.S. Environmental Protection Agency AgSTAR Program. 2011. Protocol for Quantifying and Reporting the Performance of Anaerobic Digestion Systems for Livestock Manures (en línea). Consultado 21 Agosto 2013. Disponible en: <http://www.epa.gov/agstar/documents/protocol.pdf>.

Wilkie, A., P. Simth. y F, Bordeaux. 2004. An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. *Bioresource technology* 92(1):103-109.

Zhonj, J. 2011. *Bioreactor Engineering*. 2 ed. *Comprehensive Biotechnology*, p 165-177.

Zupančič, G., y Grilc, V. 2012. Anaerobic Treatment and Biogas Production from Organic Waste: S. Management of organic waste. *InTech*. 28 p.

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización cualitativa y cuantitativa del muestreo preliminar del agua residual de la granja porcina de Zamorano después del separador de sólidos.

Parámetro	Unidad	N	Promedio	Valores
pH	-	10	7.24	6.20 - 8.20
Temperatura	°C	10	24.15	22.23 - 25.40
Sólidos totales (ST)	mg/L	10	20,072.63	4,404.00 - 122,280.00
Sólidos volátiles (SV)	mg/L	10	18,189.53	3,400.00 - 120,220.00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	9	10,488.89	1,550.00 - 28,300.00
Nitrógeno total (NT)	mg/L	9	2,009.44	1,090.00 - 2,665.00

Anexo 2. Características físico químicas de las muestras preliminares del efluente de la granja porcina de Zamorano.

Muestra	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos volátiles (%)	Sólidos volátiles (mg/L)	Sólidos Volátiles (%)	pH	T(°C)
13009	6,666.67	0.67	4,723.33	70.85	7.28	24.30
13011	15,072.00	1.51	11,568.00	76.75	6.70	23.80
13012	4,404.00	0.44	3,400.00	77.20	6.20	25.40
13014	122,280.00	12.23	120,220.00	98.32	7.20	22.23
13015	6,288.00	0.63	5,008.00	79.64	7.60	23.60
13016	10,288.00	1.03	8,240.00	80.09	7.20	25.00
13017	12,660.00	1.27	10,152.00	80.19	7.50	24.80
13018	9,668.00	0.97	7,924.00	81.96	8.20	24.70
13019	6,204.00	0.62	4,896.00	78.92	7.40	23.80
13020	7,192.00	0.72	5,764.00	80.14	7.20	23.90

Anexo 3. Características físico químicas del muestreo del efluente de la granja porcina de Zamorano, Honduras, 2013.

Muestra	Etapas	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos Volátiles (%)	Sólidos Volátiles (mg/L)	Sólidos Volátiles (%)	pH	T(°C)
13031	1	6,607.20	0.66	5,004.00	75.74	8.17	24.10
	2	11,816.40	1.18	9,920.00	83.95	7.74	24.10
13035	1	5,963.60	0.60	4,862.80	81.54	7.51	25.00
	2	10,865.20	1.09	8,988.00	82.72	7.72	24.10
13036	1	6,380.80	0.64	4,992.40	78.24	7.64	25.50
	2	6,580.40	0.66	5,158.80	78.40	7.63	25.40
13040	1	1,778.80	0.18	1,332.80	74.93	7.56	25.20
	2	17,414.00	1.74	15,001.60	86.15	7.58	25.80
13041	1	5,609.20	0.56	4,376.40	78.02	8.12	25.20
	2	5,476.40	0.55	4,349.20	79.42	8.16	25.10
13042	1	6,653.60	0.67	4,520.80	67.95	8.40	24.90
	2	14,437.60	1.44	12,223.20	84.66	7.93	24.30
13043	1	8,518.80	0.85	6,410.40	75.25	7.46	24.20
	2	12,530.80	1.25	10,391.60	82.93	7.69	23.70
13044	1	2,599.60	0.26	1,847.20	71.06	6.81	24.70
	2	21,603.20	2.16	18,787.60	86.97	7.62	24.60
13045	1	5,892.80	0.59	4,522.80	76.75	4.00	24.20
	2	12,198.00	1.22	10,054.40	82.43	7.51	24.10
13046	1	10,724.00	1.07	7,838.80	73.10	7.50	24.00
	2	12,160.00	1.22	9,621.20	79.12	7.90	24.20
13047	1	6,629.20	0.66	4,983.20	75.17	7.46	25.30
	2	15,505.20	1.55	12,696.80	81.89	7.35	25.00
13048	1	10,621.20	1.06	7,793.20	73.37	7.98	24.70
	2	12,500.40	1.25	9,280.80	74.24	7.80	24.40
13052	1	6,479.60	0.65	4,914.80	75.85	7.53	25.00
	2	16,074.80	1.61	14,412.00	89.66	7.15	24.60
13054	1	48,534.80	4.85	6,493.20	13.38	7.84	24.50
	2	12,108.80	1.21	9,772.80	80.71	7.53	23.70
13055	1	4,704.40	0.47	3,573.20	75.95	7.65	24.50
	2	13,345.60	1.33	10,845.20	81.26	7.11	24.70

Anexo 4. Análisis de laboratorio del agua residual de la granja porcina de Zamorano, UNILAB (2008).

Código: RT-02
Quinta versión

INFORME DE RESULTADOS No. 3014

Identificación de muestra: SALIDA SEPARADOR DE SÓLIDOS Y MUESTRA COMPUESTA
Tipo de muestra: AGUA RESIDUAL **Cantidad:** 2 L
Procedencia: ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA EL ZAMORANO
Dirección: EL ZAMORANO, VALLE DE YEGUARE, CARRETERA DE ORIENTE
Solicitado por: ING. CARLOS QUIROZ
Responsable toma de muestra: ING. CARLOS QUIROZ
Lote N°: ----- **Elaboración:** ----- **Vencimiento:** -----
Toma de muestra: ----- **Fecha ingreso:** 15/08/08; 5:00 PM
Fecha de análisis: 15 - 02/09/08 **Fecha entrega:** 22/09/08

Análisis	Resultado	Incertidumbre expandida*	Valor Normal**
SALIDA SEPARADOR DE SÓLIDOS			
DBO ₍₅₎	4 507,50 mg/L	N/A	-----
DQO	7 773,80 mg/L	N/A	-----
Nitrógeno Total Kjeldahl	657,89 mg/L	N/A	-----
Sólidos Totales	4 548,53 mg/L	N/A	-----
Sólidos Totales Volátiles	3 100,0 mg/L	N/A	-----
Sólidos Suspendidos Totales	2 850,0 mg/L	N/A	-----
Sólidos Suspendidos Volátiles	2 450,0 mg/L	N/A	-----
MUESTRA COMPUESTA 14/08/08 (7:00 AM - 4:00 PM)			
DBO ₍₅₎	10 822,50 mg/L	N/A	-----
DQO	17 893,20 mg/L	N/A	-----
Nitrógeno Total Kjeldahl	1 125,36 mg/L	N/A	-----
Sólidos Totales	12 082,50 mg/L	N/A	-----
Sólidos Totales Volátiles	9 682,50 mg/L	N/A	-----
Sólidos Suspendidos Totales	10 200, 0 mg/L	N/A	-----
Sólidos Suspendidos Volátiles	8 366,70 mg/L	N/A	-----
Sólidos Sedimentables	250,0 mL / L / hr	N/A	-----
----- ULTIMA LINEA -----			

Descripción de la muestra: Líquido turbio, con presencia de abundantes partículas en suspensión.

Condiciones de la muestra: La muestra se recibió en condiciones de refrigeración en frascos plásticos proporcionados por el cliente.

Observaciones: * k=2 Limite de confianza 95% ** Referencia de valores normales al reverso.
N/A = No aplica.

JEFE AREA FISICO-QUIMICA
 Ing. Victoria Cortés

DIRECCION TECNICA
 Ing. Victoria Cortés

Anexo 5. Sólidos totales y volátiles de una muestra compuesta del efluente de agua residual de la granja porcina de Zamorano antes del separador de sólidos.

ID	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos Volátiles (mg/L)
1	22,852.00	17,092.00
2	18,288.00	13,856.00
3	13,840.00	11,116.00
4	11,491.67	9,062.50
Compuesta	12,816.00	9,568.00

Anexo 6. Índice de producción de metano del montaje de biorreactores batch con dos cargas 0.5 y 3 kg SV/m³.

ID	Muestra				Batch				Índice Metano (m ³ /kg)
	Carga (kg/m ³)	Sólidos Volátiles (kg/ mL)	Volumen (mL)	Sólidos Volátiles (kg)	CH4 (mL)	CH4 (m ³)	Sólidos Volátiles (m ³ /kg)		
13011		1,16E-05	8,64	1,00E-04	46,5	3,35E-05	3,35E-01		
13012	0,5	3,40E-06	29,41	1,00E-04	45,2	3,22E-05	3,22E-01	0,35	
13014		1,20E-04	0,83	1,00E-04	14,8	1,80E-06	1,80E-02		
13015		5,01E-06	19,97	1,00E-04	51,7	3,87E-05	3,87E-01		
13031		9,92E-06	60,00	5,95E-04	140	1,40E-04	2,34E-01		
13035		4,86E-06	124,81	6,07E-04	194	1,94E-04	3,20E-01		
13036		5,16E-06	118,24	6,10E-04	179	1,79E-04	2,93E-01		
13040(2)		1,50E-05	33,70	5,06E-04	226	2,26E-04	4,46E-01		
13041(1)	3	4,38E-06	137,10	6,00E-04	248	2,48E-04	4,12E-01	0,38	
13042(1)		4,52E-06	132,22	5,98E-04	244	2,44E-04	4,08E-01		
13042(2)		1,22E-05	49,02	5,99E-04	259	2,59E-04	4,32E-01		
13043(2)		1,04E-05	57,74	6,00E-04	236	2,36E-04	3,92E-01		
13044(1)		1,88E-05	33,41	6,28E-04	245	2,45E-04	3,90E-01		
13045(2)		1,01E-05	59,68	6,00E-04	281	2,81E-04	4,67E-01		

Anexo 7. Cálculos de sólidos volátiles totales de la fosa de acopio (10 m³) de la granja de cerdos de Zamorano, Honduras, 2013.

Parámetro	Unidad	Zona de mayor concentración		Zona de menor concentración	
		Operación	Resultado	Operación	Resultado
Concentración sólidos volátiles	kg SV/ m ³	Promedio de muestreo	10.77	Promedio de muestreo	4.90
Volumen	m ³	2×2×0.35	1.40	2×2×2.15	8.60
Sólidos volátiles	kg SV	1.40 m ³ ×10.77 kg SV/ m ³	15.08	8.60 m ³ ×4.90 kg SV/ m ³	42.14
Sólidos volátiles	kg SV	15.08+42.14 = 57.22			

Anexo 8. Distribución y tendencia del pH por muestra de biorreactores batch luego del proceso de biodigestión.

