

Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en la sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano

**Anneliese López González
Francisco Emanuel De Arco Castillo**

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

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en las sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano

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

Presentado por

**Anneliese López González
Francisco Emanuel De Arco Castillo**

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2013

Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en las sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano

Presentado por:

Anneliese López González
Francisco Emanuel De Arco Castillo

Aprobado:

Victoria Cortés, M.Sc.
Asesora principal

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

Adela Acosta, Dra. C.T.A.
Asesora

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

Lourdes Espinal, Ing.
Asesora

Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en la sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano.

**Anneliese López González
Francisco Emanuel De Arco Castillo**

Resumen: En el presente estudio se evaluó el potencial energético de las aguas residuales en la sala de sacrificio de la planta de cárnicos de Zamorano, con el fin de proponer la instalación de un biodigestor en las nuevas instalaciones. Las aguas residuales de esta área en su gran mayoría están compuestas por sangre y residuos orgánicos como piel, pequeños trozos de órganos y pelos. Para conocer el potencial energético de estas aguas se determinó el índice de producción de metano y el volumen de biogás producido por cada m^3 de reactor, ambos valores obtenidos mediante la operación de reactores anaerobios a escala de laboratorio, con la introducción una de carga orgánica proveniente de las aguas residuales muestreadas durante el proceso de cosecha de las reses y los cerdos. El índice de producción de metano obtenido fue de $0.49 \text{ m}^3/\text{kg SV}$. Por otra parte, por cada m^3 de reactor se produjo 0.287 m^3 de biogás a una carga de $1.5 \text{ kg SV}/\text{m}^3$. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, si se toma en cuenta la implementación de un biodigestor de 82.4 m^3 . Traducido en términos económicos de US \$4,506.28 al año en un escenario de tres días de cosecha por semana. Acompañado de un beneficio ambiental; los reactores alcanzaron una remoción de contaminación en términos de DQO de 83% en promedio. Finalmente, se estima que la implementación de un biodigestor podría suplir 13% del total de la energía consumida anualmente en la planta de cárnicos.

Palabras clave: Biogás, DQO, índice de producción de metano, rastro, reactor.

Abstract: In the present study the potential for energy production from wastewater at slaughter room of Zamorano Meat Plant has been evaluated, in order to consider a proposal that includes the use of a digester in the new facilities. The main pollutants from slaughter wastewater are blood and organic waste such as skin, small pieces of meat and hair particles. The amount of energy that could be produce from this particular waste was measured by estimating the volume of methane and biogas produced under anaerobic conditions. A simulation at laboratory scale of anaerobic digestion process was performed, using batch reactors and continuously stirred tank reactor. The methane production index was $0.49 \text{ m}^3/\text{kg VS}$. Moreover, each m^3 of reactor produced 0.287 m^3 of biogas operating with an organic loading rate of $1.5 \text{ kg SV}/\text{m}^3$. This biogas can be used as renewable energy source. The implementation of a 82.4 m^3 digester will produce 23.6 m^3 of biogas every day. All this translated into economic terms will generate savings of US \$ 4506.28 per year considering a working period of 3 days per week at these facilities. This benefit is linked to an environmental advantage considering 83% of COD removal from the wastewater, once the anaerobic process has been concluded. Finally, it is estimated that the implementation of a digester in the meat plant, could supply 13% of the total energy consumed annually.

Key words: Biogas, COD, methane production index, reactor, slaughterhouse.

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.....	5
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4 CONCLUSIONES	19
5 RECOMENDACIONES.....	20
6 LITERATURA CITADA.....	21
7 ANEXOS	24

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Distribución de la cosecha mensual de las reses y los cerdos en la planta de cárnicos de Zamorano desde enero a septiembre de 2013.....	4
2. Métodos y parámetros fisicoquímicos utilizados en el análisis de las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano.....	6
3. Resultados de los análisis químicos determinados a partir de las aguas rojas de la sala de cosecha de la planta de cárnicos de Zamorano.	13
4. Índice de producción de metano a partir de las muestra de aguas tomadas en la sala de cosecha de la planta de cárnicos de Zamorano.	14
5. Remoción de DQO al agotamiento de los sólidos volátiles en tiempo de retenciones hidráulicos específicos para cada reactor discontinuo, cada uno instalado con una carga orgánica volátil de 3 kg/m^3	16
6. Análisis del potencial energético en dos escenarios distintos para la planta de cárnicos de Zamorano.....	18

Figuras	Página
1. Esquema y componentes de un biorreactor batch.	7
2. Esquema de medición de metano.	8
3. Esquema del recipiente de recogida de gas que desplaza el líquido.	9
4. Esquema y componentes de un reactor semicontinuo de agitación intermitente.....	9
5. Caudal en L/h de nueve muestreos de aguas rojas entre los meses de junio a septiembre de 2013.	11
6. Cálculo de caudal mediante el método de Simpson para las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano.	12
7. Índice de producción de metano de los reactores batch.	15
8. Comparación de la DQO del sustrato al inicio y final del estudio en reactores discontinuos.	17

Anexos	Página
1. Alimentación del reactor semicontinuo con la carga previamente definida por los solidos volátiles de los análisis de las aguas rojas.....	24
2. Diferenciación entre la demanda química de oxígeno inicial y final en reactores discontinuos para muestras de aguas rojas.....	24
3. Instrumentos para la homogenización de muestras de aguas rojas.	25
4. Muestras y diluciones para los análisis de nitrógeno y DQO de las aguas rojas.	25
5. Diferenciación de la cantidad de nitrógeno en los análisis de las aguas rojas.	26

1. INTRODUCCIÓN

En las industrias cárnicas, los efluentes líquidos son representados en su gran mayoría por corrientes de los procesos del desangrado y la evisceración. Estos efluentes contienen sangre, estiércol, pelos, grasas y huesos. En general, los efluentes de los rastros tienen altas temperaturas y contienen microorganismos patógenos, además de altas concentraciones de compuestos orgánicos y nitrógeno; la sangre es el compuesto con mayor carga orgánica (Signorini 2008).

Los efluentes ricos en grasas, durante la fase de acidogénesis, generan una sobreproducción de ácidos grasos volátiles, que acidifican el medio de tratamiento. En la degradación anaerobia se saturan los ácidos grasos volátiles, que inhibe la fase metanogénica. Los estudios anteriores han demostrado que las grasas de los desechos representan un contaminante muy problemático debido a su composición lipídica, altos costos para tratarlos y los altos volúmenes que se desechan, además de ser un recurso energético desperdiciado (Dias y Kreling 2006).

Las aguas rojas que provienen de la sala de sacrificio de las industrias cárnicas, tienen alta cantidad demandada de oxígeno (Sánchez 2005). Una de las razones por la que los países en desarrollo han afectado sus fuentes de agua, es por la alta acumulación de desechos que exceden la capacidad de diluirse en la fuente. Es por ello que las aguas residuales se han convertido en un problema porque naturalmente la cantidad elevada de materia no se degrada (Moncayo y Torres 2003). En Honduras la mayoría de los mataderos no poseen infraestructura adecuada para el aprovechamiento de los residuos generados a partir del sacrificio de los animales, las aguas residuales son vertidas directamente a la fuente de agua más cercana sin tener un previo tratamiento (Peña 1999).

En las plantas procesadoras de productos cárnicos, aproximadamente 4 - 5% del peso vivo del animal es sangre y tienen una concentración de materia orgánica promedio de 200,000 mg/L medida en términos de DQO. De modo que en el desangrado se descarta de 6 a 8 kg DQO/tonelada de animal (Canales y Vidal 2005). Para reducir la DQO la digestión anaerobia es una metodología aplicable al tratamiento de las aguas residuales. Esta disminuye la concentración de los contaminantes y aporta beneficios económicos para la industria ya que los desechos pueden ser aprovechados para la producción de energía. Estas medidas ambientales permiten que el producto sea mejor posicionado en el mercado y preferido por los clientes.

En Honduras, la demanda energética también está relacionada al consumo *per cápita* de productos cárnicos, como se muestra en las estadísticas en el 2011 comparadas al año 2012, que pasó de ser el sexto lugar al quinto de los productos más consumidos según la FAOSTAT (2013). Esto también provoca que exista la necesidad de importar aproximadamente US \$6 millones mensuales en combustibles fósiles y produzca una escasez irreversible en las fuentes de energía no renovables (Castillo 2012, FAO 1995).

En el año 2012, la planta de cárnicos de la Escuela Agrícola Panamericana consumía aproximadamente 400 galones de diesel a granel por mes con un total de US \$1,724 mensuales (Castillo 2012). Dicha cantidad de energía consumida, le da importancia a éste estudio por que la producción de biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, que sustituye el consumo de los combustibles fósiles o la biomasa (Hernández *et al.* 2012).

Así surge la necesidad de buscar alternativas como Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) para suplir la demanda energética. Estas alternativas pueden ser tratamientos anaerobios a partir de los residuos, que permiten la reducción de la materia orgánica y la obtención del biogás, y pueden ser utilizados para realizar actividades dentro de las industrias (Chaux *et al.* 2009).

El biogás se produce mediante la fermentación anaerobia de desechos orgánicos de origen animal o vegetal, bajo condiciones específicas de temperatura, humedad, tiempo y acidez (Chaúr 2001). En este caso la materia orgánica se transforma en compuestos más simples, que pasan por diferentes fases hasta convertirse en ácidos orgánicos que constituyen la materia prima para la producción de biogás como resultado del metabolismo de los microorganismos metanogénicos (Dias y Kreling 2006).

El proceso de la digestión anaerobia se ve afectado significativamente por el tipo de carga orgánica. A medida que el proceso promueve la formación de los ácidos orgánicos volátiles, se requiere que esta reacción encuentre un punto de equilibrio, donde los ácidos no se acumulen puesto que su incremento afectará en forma adversa el funcionamiento adecuado del reactor anaerobio (Rajeshwari *et al.* 2000). Así mismo, se ha demostrado que la temperatura y el pH son factores importantes para el rendimiento adecuado de los reactores. El pH de 6.6 a 7.4 es favorable para mantener un ambiente apropiado para los organismos descomponedores de la materia orgánica (Dinopoulou *et al.* 1988, Cuetos *et al.* 2010).

Para simular el proceso de la digestión anaerobia y la producción de biogás a escala de laboratorio, se utilizan equipos donde se llevan a cabo las diferentes reacciones expuestas bajo condiciones controladas. Para este estudio se consideró las experiencias de reactores operados en una sola etapa (batch o por lote) y un semicontinuo con agitación intermitente (Fang y Chang 1997). Según Botero y Preston (1987) la temperatura interna de operación para un reactor, se lleva a cabo en un amplio rango desde 15 °C hasta 60 °C. Sin embargo, Song *et al.* 2004 afirman que las bacterias metanogénicas presentan una mayor producción específica de metano en la etapa mesofílica, la cual abarca un rango de 30 °C a 40 °C

La carga orgánica es un parámetro que afecta significativamente la ecología y las características de los sistemas microbianos. La tasa de carga orgánica está definida por la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos puedan operar con el sustrato dentro del reactor, durante un tiempo de retención hidráulico de 15 – 30 días (Wilkie *et al.* 2004).

Los reactores tipo batch, son tanques herméticos conocidos también como sistemas discontinuos; se basan en la teoría “todo adentro todo afuera”. Consiste en adicionar pequeñas cantidades de carga orgánica en el interior del reactor, esperar el tiempo necesario para que las bacterias metanogénicas se activen y al finalizar la producción de biogás, se efectúe la descarga (Cabrera *et al.* 2012, Grau Vilalta *et al.* 1999). Los reactores semicontinuos son sistemas más flexibles pero de más difícil análisis y operación. Para controlar la velocidad de reacción se debe tener una buena estrategia, de manera que se aplique periódicamente y agregue la carga orgánica basada en la concentración de los sólidos volátiles del sustrato que constituye dicho efluente (López y Borzconí 2009).

Un estudio, sobre la producción de biogás para el sector de las procesadoras de carne y embutidos, obtuvo como resultado una estimación de 3.31 millones de metros cúbicos normales (MNm³/año). Esto equivale a 2.27 mega watts térmicos (MWt) y a 0.91 mega watts eléctricos (MWe) (Hernández *et al.* 2012, PNUD 2012).

La producción de biogás en la planta de cárnicos de Zamorano podría fluctuar, ya que la cosecha de los animales varía según la demanda de los productores externos o de la disposición de éstos en las granjas de la institución. Para el desarrollo del estudio fue importante tomar en cuenta esta variación, ya que permitió la estimación de las aguas rojas generadas.

En la planta de cárnicos de Zamorano, se aprovecha la mayoría de los desechos sólidos generados y se recolectan antes de llegar al canal de los desechos líquidos. También cabe destacar que esta planta realiza un pre tratamiento de oxigenación para evitar el impacto ambiental que generan las aguas rojas en las lagunas de oxidación. Sin embargo, siempre se descarga un porcentaje de desechos sólidos en el canal de aguas residuales. Afortunadamente en Zamorano se cuenta con cinco lagunas de oxidación como un método de tratamiento para los efluentes contaminados de dicha institución. Además, se puede estimar la cantidad de sangre que se generó en la planta de cárnicos mediante datos del cuadro 1 que detallan la cantidad de cosechas de enero a septiembre de 2013.

Cuadro 1. Distribución de la cosecha mensual de las reses y los cerdos en la planta de cárnicos de Zamorano desde enero a septiembre de 2013.

Mes	Animales	Cantidad de cabezas	Total libras
Enero	Reses	23	7,804
	Cerdos	130	22,582
Febrero	Reses	23	11,459
	Cerdos	87	14,573
Marzo	Reses	23	5,641
	Cerdos	120	21,341
Abril	Reses	25	10,041
	Cerdas	177	29,844
Mayo	Reses	14	5,081
	Cerdos	287	48,557
Junio	Reses	14	4,660
	Cerdos	262	43,153
Julio	Reses	38	15,461
	Cerdos	235	36,351
Agosto	Reses	16	7,768
	Cerdos	155	23,604
Septiembre	Reses	21	7,695
	Cerdos	196	32,699

Fuente: Elaboración propia con base a datos de la planta de cárnicos de Zamorano.

La importancia del presente estudio radica en la posibilidad de utilizar un biodigestor como tratamiento primario de los efluentes de la nueva planta de cárnicos de la Escuela Agrícola Panamericana. También dar a conocer el potencial energético de las aguas rojas para su aprovechamiento dentro de la planta, como una energía alternativa a combustibles fósiles.

El objetivo del presente documento es determinar las características físicas y químicas de las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano y la cantidad de biogás producida al aprovechar este residuo como sustrato de digestión anaerobia. Así mismo, se estima el índice de producción del metano y el potencial energético del residuo. Los datos obtenidos son utilizados en el dimensionamiento y la operación de un digestor. Se estimó su aplicación en el precalentamiento de agua para la alimentación de la caldera utilizada en la sala de cosecha.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación. El estudio se realizó en la planta de cárnicos de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Valle del Yeguaré, Honduras.

Cuantificación del residuo. La planta de cárnicos no tiene una cosecha constante que permita establecer un protocolo de toma de muestras diario. Para el desarrollo del presente estudio se realizó un muestreo simple aleatorio, con un total de 10 muestras puntuales con intervalos de frecuencia de 15 minutos en cada faena durante 2.5 horas. Se realizó la toma de muestras puntuales para la preparación de muestras compuestas representativas del periodo de duración de cada jornada de trabajo, durante los meses de Julio a Septiembre de 2013.

Se preparó un total de nueve muestras compuestas, una por cada jornada, se mezcló en forma proporcional al caudal 10 muestras puntuales obtenidas durante la actividad de muestreo, obteniéndose un volumen final de 2 L. Una porción se preservó con ácido sulfúrico y el resto de la muestra se mantuvo almacenada sin adición de preservantes. Ambas porciones fueron mantenidas a 4 °C a lo largo del estudio (Massé *et al.* 2000).

Para llevar a cabo la cuantificación del caudal, se consideraron las horas efectivas de trabajo y se realizaron aforos directos. Además, se utilizó el método de Simpson, el cual consistió en estimar el volumen diario de agua residual producido mediante la integración del área bajo la curva y se utilizó variables como: el intervalo de tiempo en la toma de muestras y el caudal promedio de cada día de muestreo. Los aforos fueron relacionados con el volumen del fluido que circula en un instante de tiempo y se representan con la ecuación:

$$Q = V/T \quad [1]$$

Q= Caudal

V= Volumen

T= Tiempo

Composición fisicoquímica del residuo. Para determinar la composición fisicoquímica de las muestras se analizó el nitrógeno total, los sólidos volátiles (SV), los sólidos totales (ST), la temperatura, el pH y la demanda química de oxígeno (DQO). En el cuadro dos, se muestran los métodos utilizados durante los análisis fisicoquímicos.

Cuadro 2. Métodos y parámetros fisicoquímicos utilizados en el análisis de las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano.

Tipo de análisis	Método	Literatura
Análisis DQO	Reactor Digestion Method1 Método 8000	HACH 2007.
Análisis de nitrógeno total	TNT plus 827. Método 10208	HACH 2007.
Análisis sólidos totales	TDS	APHA 2005
Análisis de sólidos volátiles	Fixed and Volatile Solids	APHA 2005
pH y temperatura	<i>In situ</i>	APHA 2005.

Diseño Experimental. Se utilizaron nueve reactores tipo batch alimentados con una carga orgánica de 3 kg SV/m³ y sellados herméticamente a una temperatura de 35 °C. Se midió la cantidad de metano producido cada tres días hasta obtener la conversión total de los sólidos volátiles presentes en los reactores. Se manejó un reactor semicontinuo de agitación intermitente durante 28 días, el cual se alimentó con una carga orgánica de 1.5 kg SV/m³, manipulando las condiciones de operación como; el pH, la temperatura y la agitación.

Índice de producción de metano (IPM). Para la obtención del IPM se realizó el montaje de los reactores batch (por lote). Para este montaje primero se homogenizaron las muestras y luego se analizaron los sólidos totales y los sólidos volátiles. Los resultados obtenidos se utilizaron en la estimación de la carga orgánica a la cual fue alimentado cada reactor. Después se utilizó un inóculo de bacterias metanogénicas al que se le adicionó un volumen determinado de aguas rojas, según la cantidad de sólidos volátiles obtenidos a partir del análisis de cada muestra.

Para determinar la cantidad de volumen de muestra aplicado a cada reactor se utilizó la siguiente fórmula:

$$Vm = \left(\frac{C.O \times Vr}{SV} \right) \times 1000 \quad [2]$$

Vm = volumen de muestra (mL)

C.O = carga orgánica (3 mg SV/mL)

Vr = volumen del reactor (200 mL)

SV = sólidos volátiles (mg/L)

Finalmente, se le proporcionó las condiciones de temperaturas mesofílicas en una incubadora (35 °C). En la Figura 1 se muestra el reactor con selladores herméticos compuestos por un tapón de hule y un sello metálico que generaron condiciones anaerobias.

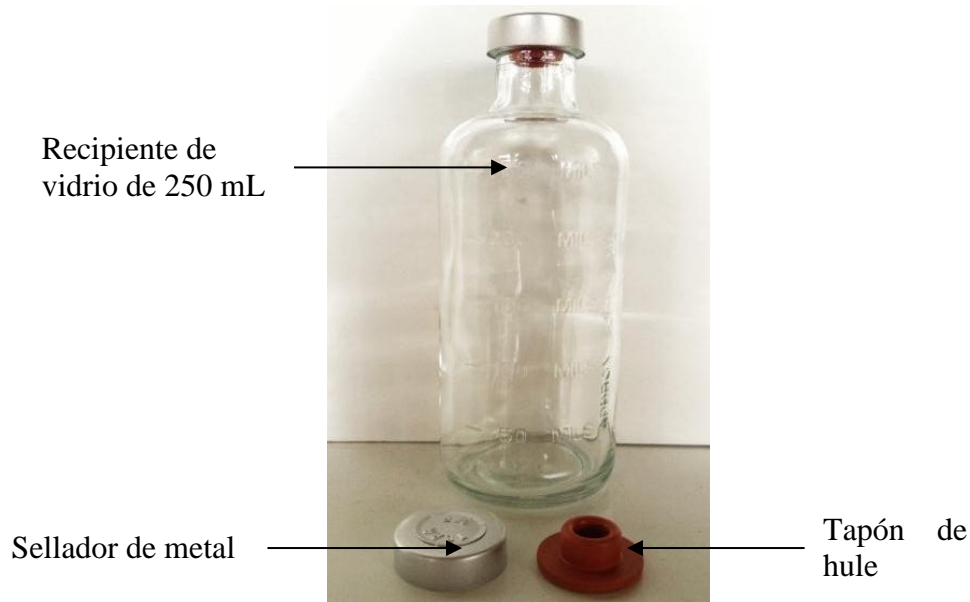


Figura 1. Esquema y componentes de un biorreactor batch.
Fuente: Elaboración propia.

Mediciones de metano y construcción de las curvas de metano acumulado. Se midió la cantidad de metano mediante el método volumétrico. Este consistió en utilizar Hidróxido de Potasio (KOH) y rojo de Alizarina para absorber todos los gases del reactor como: CO_2 , H_2S , N_2 e H_2 . El único gas que no pudo ser diluido fue el metano (CH_4). Esto se debe a las propiedades químicas del metano que no reaccionan con esta solución alcalina. Finalmente, a causa del gas metano se midió el desplazamiento de la solución alcalina (KOH + rojo de Alizarina) en mililitros a una bureta (Figura 2). Este procedimiento fue utilizado y adaptado por Wilkie *et al.* (2004).



Figura 2. Esquema de medición de metano.
Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de las curvas acumuladas de metano se midieron los reactores batch en intervalos de tres días, se sumó la cantidad de mL producidos en la medición anterior más la cantidad de mL producido en el siguiente intervalo. Estas mediciones se realizaron hasta agotar la presencia de los sólidos volátiles y que la curva presentara una asíntota que es un indicador de agotamiento. Para obtener el IPM se dividió la cantidad total de volumen acumulado entre la carga orgánica con que fue alimentado el reactor multiplicado por el volumen del reactor. La ecuación tres demuestra cómo se obtuvo el IPM. Las unidades para representar el IPM son $\text{m}^3/\text{kg SV}$.

$$IPM = V_{\text{metano}} / (C.O \times V_r) \quad [3]$$

IPM = Índice de Producción de metano ($\text{m}^3/\text{kg Sv}$)

V_{metano} = Volumen de metano acumulado (m^3)

C.O = Carga orgánica (kg/m^3)

V_r = Volumen del reactor (m^3)

Cuantificación de la producción de biogás en reactores semicontinuos de agitación intermitente (RSCAI). Para cuantificar la producción de biogás por unidad de volumen de reactor se utilizaron dos recipientes herméticamente sellados. Ambos recipientes contenían 5 L de agua (Figura 3). El biogás producido dentro del RSCAI, se traslada por medio de una manguera conectada a un tubo que llega hasta la parte superior situado dentro del recipiente de vidrio. Luego, al introducirse el biogás en el recipiente, éste ejerce presión sobre el agua, desplazándola hacia otro recipiente de plástico para contabilizar el volumen de biogás producido.



Figura 3. Esquema del recipiente de recogida de gas que desplaza el líquido.
Fuente: Elaboración propia.

El reactor semicontinuo está compuesto por un motor de bajas revoluciones conectado a una varilla de acero, doblada para cumplir la función de agitar el contenido de forma intermitente (Figura 4). Al recipiente cerrado se conectaron tres tubos de plástico flexible con tapones de goma, uno sirve para transportar el biogás hacia el medidor de gases, y dos que cumplen la función de entrada y salida de la materia orgánica; una cinta térmica rodea el recipiente para mantener una temperatura controlada de 35 °C (Wilkie *et al.* 2004).

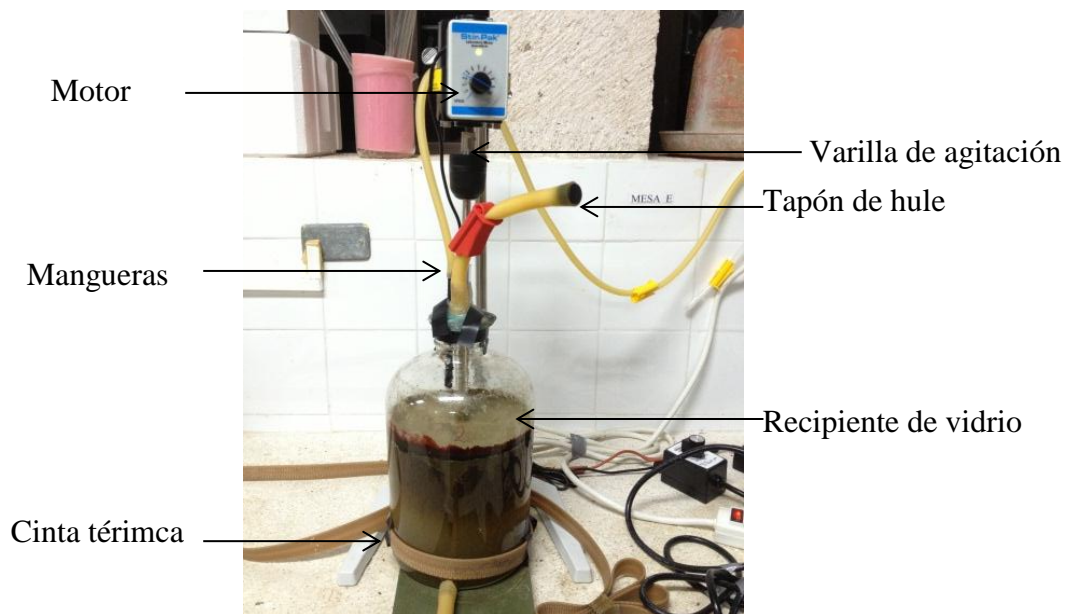


Figura 4. Esquema y componentes de un reactor semicontinuo de agitación intermitente.
Fuente: Elaboración propia.

Para el montaje del RSCAI se utilizaron tapones que fueron perforados con un taladro y una broca de 0.012 y 0.019 metros. Posterior al perforado, se procedió a limar el tapón de goma para que existiera mayor superficie de contacto con las varillas de vidrio y plástico. Por último, se selló el RSCAI con el tapón rodeado de teflón y cubierto con silicón.

El arranque del reactor se realizó con un inóculo que funcionó como fuente de microorganismos para la degradación de materia orgánica y producción de metano. Previo a la alimentación del RSCAI, se homogenizó la muestra, se midió el pH y las temperatura. Todo esto con el fin de conocer las condiciones del sustrato para evitar que las bacterias inhibieran su función de degradar la materia orgánica. Para conocer la carga orgánica se utilizó la ecuación 4. Posterior a la determinación de la carga orgánica, la alimentación se realizó cada dos días con un promedio de 159 mL de aguas rojas que simuló el período de cosecha en la planta de cárnicos. Este volumen de aguas rojas introducido al RSCAI fue determinado mediante a la ecuación cuatro y utilizando una carga orgánica de 1.5 kg SV/m³.

$$C.O = (Vm \times SV)/Vr \quad [4]$$

Donde:

C.O= carga orgánica (kg SV/m³)

Vm= volumen de muestra (m³)

SV= sólidos volátiles (kg SV/m³)

Vr= volumen de reactor (0.003 m³)

Los resultados de la medición de biogás fueron expresados en L biogás/día y m³ de biogás/m³ de reactor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los caudales medidos por aforos directos determinaron fluctuaciones diarias muy amplias, asociadas a las diferentes actividades realizadas durante la cosecha y debido al manejo rotativo del personal de trabajo (estudiantes de aprender haciendo). Otra razón de las fluctuaciones de los caudales, son las inconsistencias semanales de las cosechas que no son constantes ya que los proveedores (Zamorano y productores locales) no cuentan con sistemas tecnificados para abastecer diariamente la planta de cárnicos.

El comportamiento de los caudales obtenidos durante los días de muestreo (Figura 5), corresponden a períodos de cosecha en la planta de cárnicos de Zamorano.

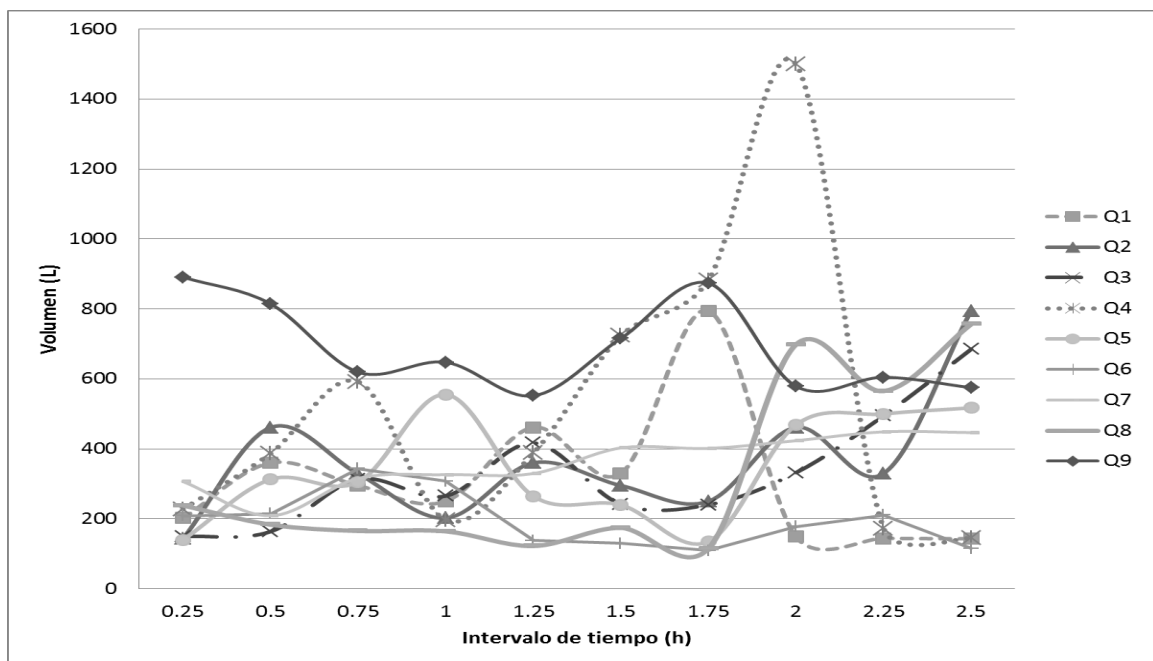


Figura 5. Caudal en L/h de nueve muestreos de aguas rojas entre los meses de junio a septiembre de 2013.

El efluente de los días 1 y 2 presentaron un comportamiento similar. Sin embargo, los días 4 y 9 se determinaron los mayores picos de consumo de agua que los días mencionados anteriormente. También se puede decir que hubo uniformidad en los primeros intervalos muestreados de los días 1, 2, 3, 5, 6 y 7. Por otra parte, una de las razones de estas fluctuaciones es el tiempo en que los estudiantes usaban las mangueras. Por ejemplo, por cada grupo nuevo que practicó cosecha en la planta de cárnicos gastó más agua en

comparación con los grupos que tenían un previo conocimiento sobre como limpiar el área mientras se cosechaban los animales. Otra razón válida para estas fluctuaciones es que las presiones y tiempos de usos variaban según la rotación de los grupos de estudiantes.

Con el fin de estimar el volumen del efluente de la sala de cosecha de la planta de cárnicos, se promediaron los caudales obtenidos en muestreos previos para trabajar con un dato que permita realizar proyecciones diarias del volumen total generado durante las actividades de cosecha (Figura 6).

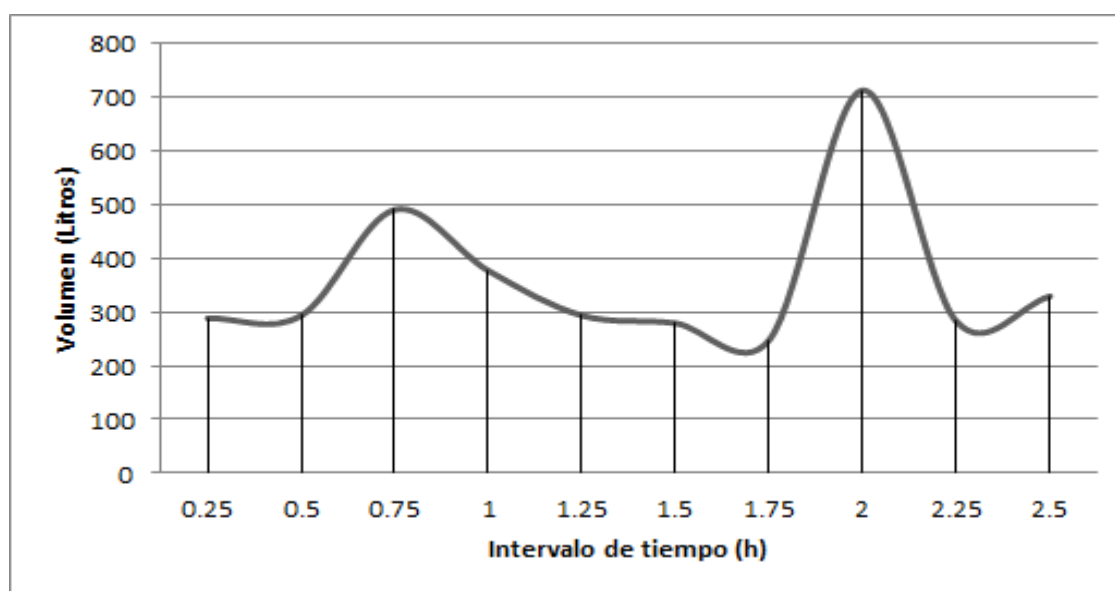


Figura 6. Cálculo de caudal mediante el método de Simpson para las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano.

Para calcular el volumen diario de agua residual producida se utilizó el método de Simpson, el cual consiste en aproximar la integración del área bajo la curva. Las variables consideradas en este método son: un intervalo de 0.25 horas y los caudales promedio obtenidos durante los aforos realizados. Se obtuvo un caudal de 825 L/h y en base a cinco horas de trabajo efectivo se determinó que el caudal de la sala de cosecha es 4.12 m³/día.

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{3} \Delta x [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)]$$

Características físicoquímicas del sustrato. El análisis del pH realizado al momento de toma de muestra determinó valores dentro de 6.8–7.5, los cuales se consideran apropiados para la digestión anaerobia (Sánchez 2005). Este pH es favorable para mantener un ambiente apropiado a las bacterias metanogénicas las cuales producen metano a rangos de temperaturas mesofílicas (Cuetos *et al.* 2010). Se realizaron mediciones de temperatura *in situ* ya que este parametro podrá influir en el tratamiento operado bajo condiciones fuera del laboratorio. Resultados de los análisis químicos de las aguas rojas de la planta de cárnicos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resultados de los análisis químicos determinados a partir de las aguas rojas de la sala de cosecha de la planta de cárnicos de Zamorano.

Día muestreado	Sólidos totales (mg/l)	Sólidos volátiles (mg/l)	pH	T (°C)	Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	Nitrógeno total (mg/L)
1	26,806	25,028	6.78	24.20	39,600	1,540
2	64,480	61,920	6.80	24.50	78,650	1,445
3	52,988	51,454	7.46	24.60	32,350	1,775
4	22,964	21,622	7.52	24.90	23,225	875
5	21,800	20,592	7.29	24.20	27,000	1,348
6	20,228	19,198	6.94	24.50	55,550	2,135
7	40,504	38,490	7.52	24.50	18,900	1,220
8	9,756	9,218	7.17	24.40	15,600	2,510
9	11,399	10,678	6.75	24.20	16,400	1,295

El análisis del contenido de la materia orgánica medida en términos de la DQO determinó concentraciones entre 15,600-78,650 mg/l y con un promedio superior de 34,000 mg/L. También los sólidos totales y volátiles demostraron amplios rangos desde 9,756 a 64,480 mg/L y 9,218 a 61,920 mg/L respectivamente. Adicionalmente, se analizó el contenido de nitrógeno total, el cual osciló entre 875-2510 mg/l con un promedio superior a 1500 mg/L.

Estos valores determinan el potencial del residuo para su aprovechamiento energético mediante la producción de biogás, ya que tienen características como el alto contenido de materia orgánica, relación C:N del orden de 23:1 como el máximo valor obtenido. Estos valores son similares a los datos obtenidos en otras investigaciones (Rajeshwari *et al.* 2000, Massé *et al.* 2001).

Sin embargo, los valores también indican la necesidad de contar con un tratamiento para las aguas rojas. Por lo cual la digestión anaerobia resulta una de las tecnologías apropiadas y de alto rendimiento para la reducción de la materia orgánica presente. Esta tecnología puede alcanzar valores entre el 85% y 90% de reducción de materia orgánica en términos de DQO según del Pozo *et al.* (2000).

Índice de producción de metano. Durante este estudio se evaluó el rendimiento de la degradación anaerobia de las aguas rojas mediante la producción de metano. A partir de los reactores tipo batch, se determinó una producción de metano entre 0.16-0.94 m³CH₄/kg SV obteniendo una media de 0.49 m³CH₄/kg SV. Sin embargo, en estudios anteriores según Hejnfelt y Angelidaki (2009) y Cuetos *et al.* (2010) obtuvieron promedios de 0.487 m³CH₄/kg SV y 0.50 m³CH₄/kg SV respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos en la evaluación de las aguas rojas de la planta de cárnicos de Zamorano.

El índice de producción de metano tiene apreciable variabilidad (Cuadro 4) que se encuentra asociada a la actividad industrial de la planta de cárnicos que se refleja en características diferentes para cada muestra obtenida. Aunque las muestras tuvieron diferentes producciones de metano, la variabilidad también se les puede atribuir la heterogeneidad del sustrato ya que algunas muestras estaban compuestas por pequeñas partículas sólidas como: los pelos, las vísceras y pequeños restos orgánicos de los animales.

Cuadro 4. Índice de producción de metano a partir de las muestra de aguas tomadas en la sala de cosecha de la planta de cárnicos de Zamorano.

Carga Orgánica Volátil (3kgSV/m³)	IPM (m³/kg SV)
M1	0.938
M2	0.162
M3	0.163
M4	0.638
M5	0.616
M6	0.669
M7	0.257
M8	0.490
M9	0.459

Las muestras en su gran mayoría estaban compuestas de aguas rojas, pero existieron residuos que alteraron el sustrato de manera que las fluctuaciones entre cada muestra tuvieron repercusión al producir metano. El metano oscila entre 560 mL CH₄ y 96 mL CH₄ (Figura 7).

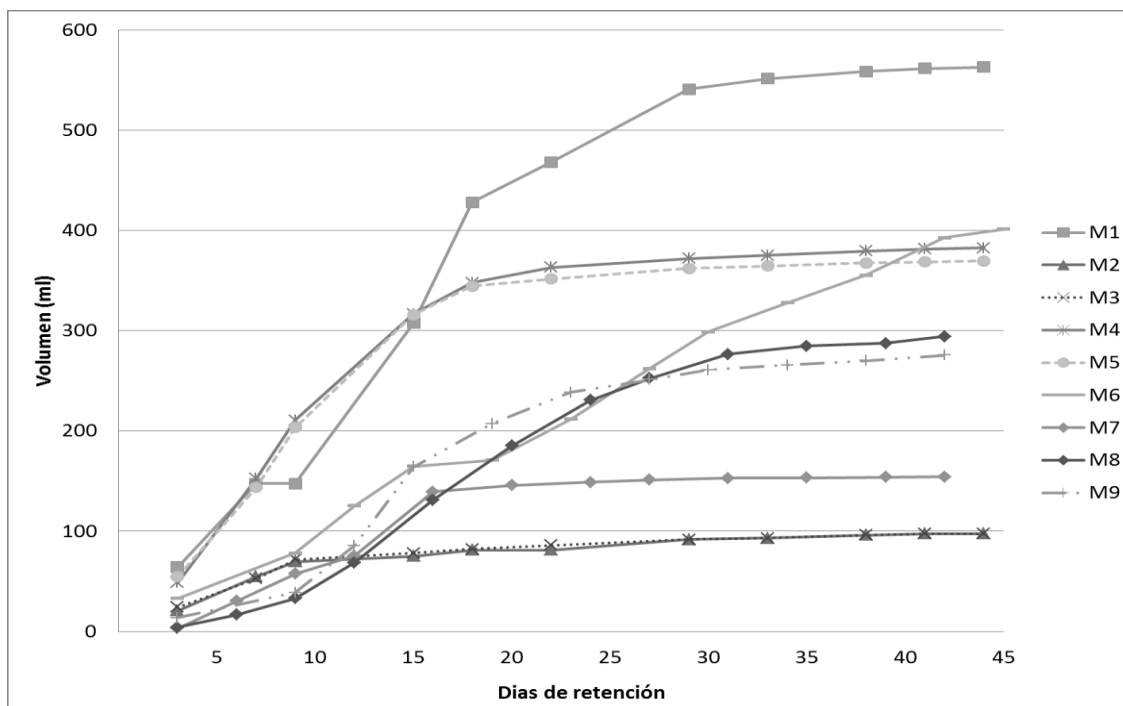


Figura 7. Índice de producción de metano de los reactores batch.

A partir de la curva de producción de metano (Figura 7) se obtuvo el tiempo de retención hidráulica (TRH), el cual representa el período de conversión de sólidos volátiles en metano. Así mismo proporcionan la cantidad de metano producido por cada ensayo, que posteriormente se traduce en términos del IPM. La conversión de 100% de sólidos volátiles en CH_4 se obtuvo luego de un período de 45 días, aunque a los 20 días se registró 88% de conversión de SV en CH_4 , siendo esta la de mayor eficiencia.

Producción de biogás en el reactor semicontinuo de agitación intermitente (RSCAI).

En el RSCAI se manipularon las condiciones de operación como la temperatura a $35\text{ }^\circ\text{C}$, con agitación intermitente durante 30 minutos y alimentación de 1.5 kg SV/m^3 . La alimentación fue simulada como si la planta de cárnicos cosechara animales tres días a la semana, o sea en día de por medio. Se obtuvo una producción media de biogás de 0.86 L/día en un reactor de 3 L . En otras palabras, por cada m^3 de reactor se puede obtener 0.287 m^3 de biogás.

Remoción de materia orgánica. El estudio determinó un promedio de 34 kg DQO/m^3 lo que indica que la planta de Zamorano se encuentra dentro del rango de $5\text{-}40\text{ kg DQO/m}^3$ publicado por Rajeshwari *et al.* (2000). La muestra compuesta, número seis presentó un máximo valor de DQO inicial, por encima de los $9,000\text{ mg/L}$. Luego de un período de retención hidráulica de 45 días en reactores batch, se obtuvo una remoción en más de 80%, valor que aporta beneficios ambientales para la reducción carga orgánica en términos de DQO.

El análisis realizado en la salida de los reactores anaerobio dio como resultado un promedio de 83%, (Cuadro 5). Además, se obtuvo un valor máximo de remoción de 88% en los reactores discontinuos.

Cuadro 5. Remoción de DQO al agotamiento de los sólidos volátiles en tiempo de retenciones hidráulicos específicos para cada reactor discontinuo, cada uno instalado con una carga orgánica volátil de 3 kg/m³.

Muestra	DQO Inicial mg/L	DQO Final mg/L	% Remoción
1	5,511.52	1,100	80%
2	4,637.46	850	82%
3	2,704.48	500	82%
4	3,970.84	600	85%
5	4,675.96	650	86%
6	9,413.80	1,550	84%
7	2,274.38	600	74%
8	5,742.51	700	88%
9	5,141.23	700	86%

Se tomó en consideración la concentración promedio de DQO en el efluente crudo 34,000 mg/L DQO, se obtuvo una eficiencia de remoción de 74% hasta 88%. Se resume el impacto de la digestión anaerobia en la reducción de materia orgánica para los diferentes ensayos (Figura 8).

Todos los valores de remoción de DQO contribuyen a afirmar que la digestión anaeróbica es un proceso eficiente para el tratamiento de aguas residuales. Se comparó los resultado obtenidos con del Pozo *et al.* (2000) y Massé *et al.* (2001) y se argumenta que son similares los valores de reducción de DQO.

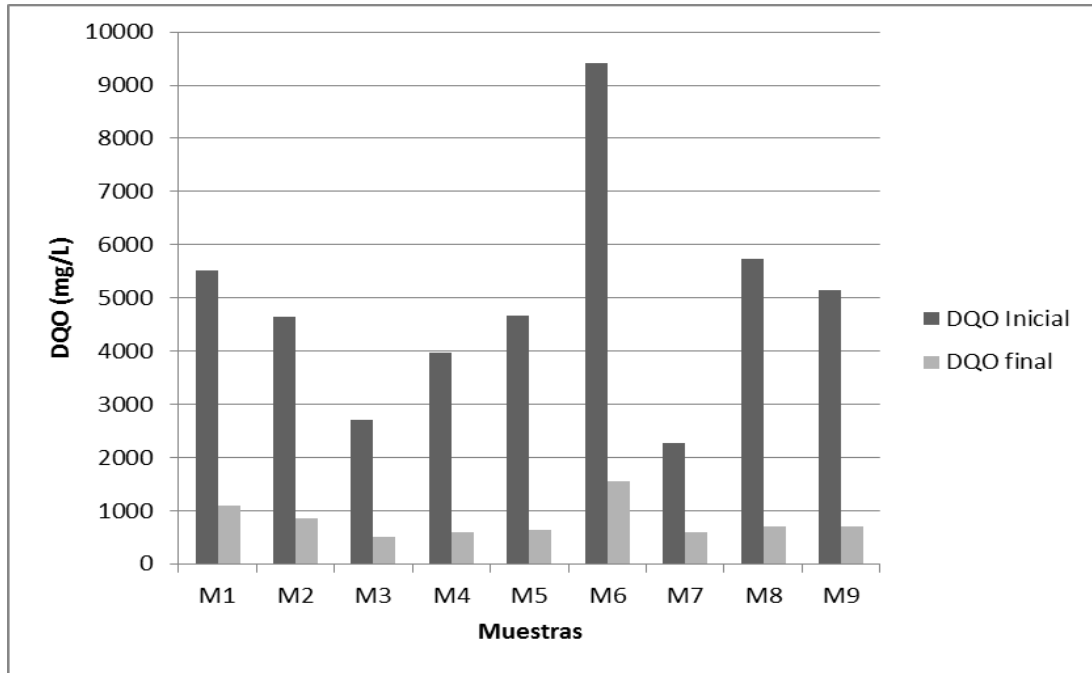


Figura 8. Comparación de la DQO del sustrato al inicio y final del estudio en reactores discontinuos.

Dimensionamiento de un biodigestor. Para determinar las variables óptimas de diseño se tomó en cuenta los requerimientos del beneficiario. Uno de los requerimientos principales es la producción de energía en corto tiempo. Así que para el diseño de digestores se determinó el tiempo de retención hidráulica que tiene mayor conversión de SV a CH₄, carga orgánica y productividad de biogás.

El TRH se encuentra determinado por el caudal medio diario y esto dará como resultado el tamaño del reactor. Para seleccionar el TRH más apropiado, se tomó la información proporcionada en las curvas de metano acumulado.

De acuerdo al comportamiento del residuo en las curvas obtenidas, se estima que el tiempo de retención apropiado es aquel que conduce a un menor tamaño de reactor (uso eficiente del terreno) y una mayor productividad de metano. Al combinar estas variables, obtenemos un TRH de 20 días en donde se obtiene la conversión de 88% de los SV presentes en el residuo.

La ecuación utilizada para calcular el dimensionamiento fue:

$$V = TRH \times Q [6]$$

Donde:

TRH= tiempo de retención hidráulica (días)

Q= caudal medio (m³/día)

Como resultado de la multiplicación de los 20 días de TRH y el caudal medio diario de 4.12 m³/día se obtuvo el tamaño de un digestor de 82.4 m³. Finalmente, con este tamaño de digestor se calculó la cantidad de biogás por medio de la ecuación 7 y se obtuvo de 23.6 m³ de biogás por faena o día cosechado.

$$Vb = \frac{Vd \times Vb(1m^3)}{1m^3 reactor} [7]$$

Donde:

Vb= Volumen de biogas (m³)

Vd= Volumen del digestor (m³)

Vb= Volumen de biogas producido en 1m³

Con la cantidad de biogás producido en un lugar determinado, los beneficios que podrían implementarse en distintas areas son: por cada m³ de biogás se puede utilizar una heladera de 0.40 metros cúbicos durante 10 horas, motor de 1 hp durante 2 horas, pantalla infrarroja de 3,000 calorías durante 3 horas y un termotanque de 110 litros durante 3 horas (Manual para la producción de biogás IIR s.f) A este criterio de diseño se le puede dar un valor agregado para la venta o ahorro de energía, ya que por cada kWh vendido tendrá un precio de US \$0.18 (CZER 2013).

Cuadro 6. Análisis del potencial energético en dos escenarios distintos para la planta de cárnicos de Zamorano.

Parámetros	Unidades	Biogás (3días/semana)	Biogás (2días/ semana)
Carga orgánica	kg SV/m ³	1.50	1.50
Volumen/día	m ³	23.60	23.60
Volumen/año	m ³	3,681.60	2,454.40
Contenido energético/m ³ de biogás	kWh	6.80	6.80
Energía producida	kW/año	25,034.88	16,689.92
Precio de energía (1 kWh= \$0.18)	\$/año	4506.28	3004.19

La planta de cárnicos obtendrá ahorros de US \$4,506.28 por año si tiene cosechas constantes de tres veces a la semana. En cambio, si solo se cosecha dos veces por semana la planta sólo tendrá ahorros de US \$3,004.19 anuales a precios constantes de US \$0.18 (Cuadro 6).

4. CONCLUSIONES

- La variabilidad de las características del sustrato está reflejada en los resultados de los análisis fisicoquímicos obtenidos, así como en las curvas de producción de metano. Sin embargo, los valores obtenidos demuestran que el residuo puede ser aprovechado en la generación de energía, se derivaron ahorros energéticos significativos en la planta de cárnicos.
- Se obtuvo un promedio del índice de producción de metano de $0.49 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$, sin embargo, la variabilidad a lo largo del ensayo se encuentra asociada a la heterogeneidad del residuo. Esta condición influirá en la cantidad de biogás producida en un biodigestor operado bajo estas condiciones.
- La productividad de biogás medida en términos de volumen producido por cada m^3 de reactor es de 0.287 m^3 de biogás en 1 m^3 de reactor, sin embargo la variabilidad en la calidad del efluente y la intermitencia en la alimentación del digestor se reflejará en la producción diaria de biogás.
- Para el aprovechamiento del volumen total de las aguas residuales producidas durante un día de faena se obtuvo que el volumen del digestor requerido es de 82.4 m^3 con un potencial de generar 23.6 m^3 de biogás diarios operando con una carga orgánica de $1.5 \text{ kg SV}/\text{m}^3$, al aprovechar el potencial energético del residuo generado.
- Se estima que de la operación de un digestor en la planta de cárnicos se podrían obtener beneficios económicos reflejados en el ahorro de US \$4,506 por año.
- La aplicación de la digestión anaerobia a las aguas rojas proporcionará una remoción de materia orgánica promedio de 83% en función de la DQO.

5. RECOMENDACIONES

- Para estimar el potencial energético de las aguas rojas en forma exclusiva, el efluente debe ser filtrado para remover las partículas de material orgánico distinto a la sangre y de esta forma se obtendrá una menor variabilidad en las características del residuo y la obtención de resultados con mayor homogeneidad.
- Analizar la integración de vísceras blancas no utilizadas en conjunto con las aguas rojas para incrementar el contenido de materia orgánica y la producción de biogás en la planta de cárnicos de Zamorano.
- En la etapa de diseño de un digestor anaerobio se recomienda integrar un tanque reservorio que pueda conferir resiliencia a la operación del digestor. Evitar la inclusión de las aguas de lavados que puedan alterar el ambiente en que se desarrollan los microorganismos.

6. LITERATURA CITADA

Angelidaki, I., D.J. Batstone y D. Karakashev. 2005. Influence of environmental conditions on methanogenic composition in anaerobic biogás reactors. *Applied and environmental microbiology*. American Society for Microbiology 71:331-338.

American Public Health Asociation (APHA). 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 20a ed. American Public Health Association. Washington, EUA. 1325 p.

Balseca de la Cadena, D. A. y J.C. Cabrera Bastidas. 2011. Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café. Tesis Ing. Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Valle del Yeguaré, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. 17 p.

Botero Botero, R. y T.R. Preston. 1987. Biodigestores de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas, manual para su instalación y utilización. Colombia. 20 p.

Canales Canales, C. y A.P. Vidal. 2005. Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector cárnico. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente. 205p.

Castillo Stevenson, O.A. 2012. Evaluación económica financiera de sistema Solar térmico parabólico en la planta de cárnicos de Zamorano. Tesis Ing. Agronegocios., Valle del Yeguaré, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. 26p.

Chaúr, J. 2001. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). El biogás. Boletín didáctico No.32. Bogotá, Colombia. 40p.

Chaux, G., G. Rojas, L. Bolaños. 2009. Producción más limpia y viabilidad de tratamiento biológico para efluentes de mataderos en pequeñas localidades Caso: Municipio del Tambo (Colombia). *Revista de Biotecnología Agropecuaria* 7:102-114.

Comisión Nacional de Energía. s.f. Biocombustibles y tipos de energías (biogás). Consultado el 20 de octubre de 2013. Disponible en: <http://www.cne.cl/energias/biocombustibles/tipos-de-energia/337-biogas>

Cuetos, M.J., X. Gómez, M. Otero, y A. Morán. 2010. Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): Influence of heat and pressure pre-treatment in biogás yield. *Waste Management Journal* 30:1780-1789.

del Pozo, R., V. Diez, y S. Beltrán. 2000. Anaerobic pre-treatment of slaughterhouse wastewater using fixed-film reactors. *Bioresource technology* 71:143-149.

Dias Da Silva, J. y J.C. Kreling. 2006. Evaluación de la productividad y del efluente de biodigestores suplementados con grasas residuales. Tesis Ing. Agr., Costa Rica, Universidad Earth. 73 p.

Dinopoulou, G., T. Rudd, J.N. Lester. 1988. Anaerobic acidogenesis of a complex wastewater: 1. The influence of operational parameter on reactor performance. *Biotechnology and bioengineering* 31:958 – 968.

Dolors Grau Vilalta, M. y L. Puigjaner Corbella. 1999. Estudio del comportamiento de reactores discontinuos y semicontínuos: modelización y comprobación experimental. Cataluña, España. 24p.

Fang, H. P. y O. Chang. 1997. Toxicity of phenol towards anaerobic biogranules. *Water research* 31(9):2,229-42.

Food and Agriculture Organization (FAO). 1995. Memoria - Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa (en línea). Consultado 18 de agosto 2013. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s00.htm#Contents>

Food and Agriculture Organization, Statistics (FAOSTAT). 2013. Top production Honduras. Food and agriculture organization of the United Nations (FAO) (en línea). Consultado 12 de junio 2013. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>

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.

Henjfelt, A. y I. Angelidaki. 2009. Anaerobic digestion of slaughterhouse by products. *Biomass and Bioenergy Journal* 33:1046-1054.

Hernández, E., S. Samayoa, E. Álvarez, y C. Talavera. 2012. Biogás, su potencial de producción en Honduras. Editorial Comunica. 75 p.

Hilbert, J.s.f. Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural 1:1-54.

López, I. y L. Borzacconi, 2009. Introducción al diseño de reactores. (en línea). Consultado 07 abril de 2013. Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/iq/maestrias/DisenioReactores/materiales/notas1.pdf>

Massé D y L. Massé. 2001. The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment in anaerobic sequencing batch reactors. *Bioresource Technology* 76:91-98.

Medina Izaguirre, Z. I. y J. A. Luna Vega. 2009. Estudio de pre factibilidad para el aprovechamiento del biogás con fines energéticos a partir del estiércol de ganado bovino en la Unidad de Ganado Lechero de Zamorano, Honduras. Tesis Ing. Agr. Valle del Yeguaré, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. 23 p.

Moncayo, G. y M. Rivera Torres. 2003. EL tratamiento de aguas residuales y desechos orgánicos en digestores biológicos anaeróbicos y producción de biogás. <http://www.aqualimpia.com/PDF/El%20Zamorano%20Biodigestores%20Anaerobicos.pdf>

Peña Peña, A. J. 1999. Los mataderos y el medio ambiente. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (en línea). Consultado 19 agosto de 2013. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/resisoli/matade/matade.html>

Rajeshwari, K. V., M. Balakrishnan, A. Kansal, K. Lata y V.V.N. Kishore. 2000. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable & sustainable energy reviews* 4:135-156.

Sanchez Mendoza, H.E. 2005. Caracterización física y química del efluente líquido de la sala de sacrificio y deposte de la empresa universitaria de industrias cárnicas de Zamorano. Tesis Ing. Agroindustrial. Valle del Yeguaré, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. 15 p.

Signorini, S. 2008. Rastros municipales y su impacto en la salud pública. Monterrey, México. *Nacameh*. 2:1-24.

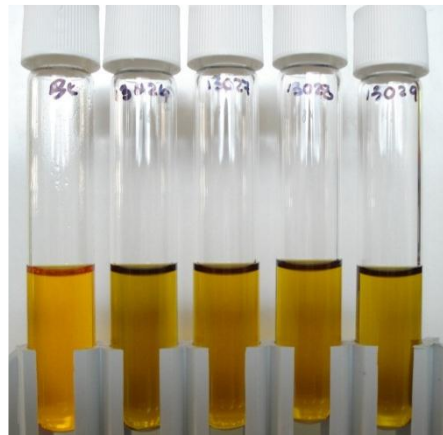
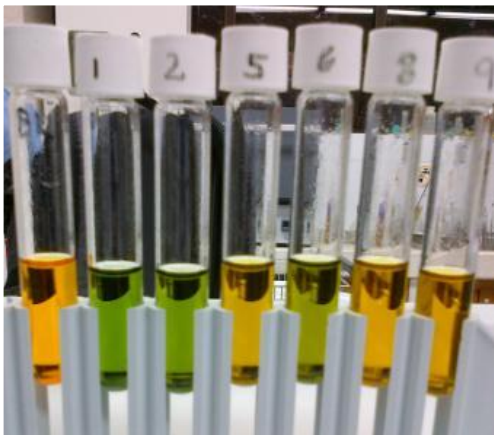
Song, Y. C., S.J. Kwon y J.H. Woo. 2004. Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge *8:1653-1662*.

Wilkie, A.C., P.H. Smith y F.M. Bordeaux. 2004. An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. *Bioresource technology* 92:103-109.

7. ANEXOS



Anexo 1. Alimentación del reactor semicontinuo con la carga previamente definida por los sólidos volátiles de los análisis de las aguas rojas.



Anexo 2. Diferenciación entre la demanda química de oxígeno inicial y final en reactores discontinuos para muestras de aguas rojas.



Anexo 3. Instrumentos para la homogenización de muestras de aguas rojas.



Anexo 4. Muestras y diluciones para los análisis de nitrógeno y DQO de las aguas rojas.



Anexo 5. Diferenciación de la cantidad de nitrógeno en los análisis de las aguas rojas.