

Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas

Ricardo Javier Canales Rivas

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2011

ZAMORANO
CARRERA DE DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTE

Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas

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

Presentado por

Ricardo Javier Canales Rivas

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2011

Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas

Presentado por:

Ricardo Javier Canales Rivas

Aprobado:

Alejandra Claire, B.Sc.
Asesora principal

Arie Sanders, M.Sc.
Director
Carrera de Desarrollo Socioeconómico
y Ambiente

Arie Sanders, M.Sc.
Asesor secundario

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

RESUMEN

Canales 2011. Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 20 p.

La inclusión de digestión anaerobia, no sólo proporciona un importante potencial de producción energía renovable y un ahorro en combustible fósil, sino que conlleva a buscar alternativas viables que mejoren el sistema de aprovechamiento de residuos (Fonts, 2007). Es así que la caracterización de las aguas residuales es un factor clave y necesario para la producción de biogás, ya que depende de ciertos parámetros como el pH, temperatura, y una relación carbono/nitrógeno adecuada a fin de que las bacterias metanogénicas, iniciadoras del proceso de biodigestión puedan subsistir en dicho ambiente. En el estudio se utilizó un sistema de biodigestores tipo Batch, el cual un sistema cerrado discontinuo para la producción de biogás y se realizaron cuatro repeticiones dos tipos de mezclas en diferentes proporciones de aguas residuales y de residuos agrícolas de la compostera (restos de cáscaras de naranja y olotes). Las aguas residuales fueron obtenidas de la laguna facultativa No. 1. De Zona 2 de la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), y se utilizaron residuos agrícolas de la compostera, también ubicada en el mismo sitio. La proporción de mezclas realizadas fue de 80 % de aguas residuales y 20 % de residuos agrícolas y la segunda mezcla consistió en 50 % de aguas residuales y 50 % de residuos agrícolas. El ensayo se realizó bajo condiciones ambientales no controladas durante un período de 43 días entre los meses de agosto a octubre para la mezcla 80/20 fue de 24.65 ml por cada litro de mezcla y para la segunda mezcla 50/50 residuales fue de 24.71 ml de por cada litro de mezcla.

Palabras clave: Agua residual, biodigestores, biogás, residuo agrícola.

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. DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	8
4. CONCLUSIONES.....	10
5. RECOMENDACIONES.....	11
6. LITERATURA CITADA.....	12

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS

Cuadros	Página
1. Componentes del biogás.....	1
2. Porcentaje de sustratos y cantidad de repeticiones.....	4
3. Datos de pH obtenido pre-sellado de biodigestores.	5
4. Relación C/N de algunos materiales.....	6

Figuras	Página
1. Fases de un reactor anaeróbico.....	2
2. Desplazamiento de la columna de aceite en función del tiempo de retención y de la temperatura ambiente promedio diaria.	8
3. Volumen total de biogás producidos por tratamiento.....	9

1. INTRODUCCIÓN

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano y dióxido de carbono, y pequeñas porciones de otros gases, como H₂S, H₂, NH₃, entre otros. Además que la composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del tipo de proceso (Fonts, 2007).

Cuadro 1. Componentes del biogás.

Componentes	Fórmula Química	Porcentaje %
Metano	CH ₄	60-70
Gas Carbónico	CO ₂	30-40
Hidrógeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido Sulhídrico	H ₂ S	0.1

Fuente: Botero, 1987.

Las fases principales del proceso anaerobio son cuatro, las cuales se detallan a continuación:

- Fase I: Hidrólisis. Consiste en que la materia orgánica compleja como proteínas, carbohidratos, grasas es transformada por bacterias hidrolíticas y fermentativas hasta compuestos simples. Es por ello que las moléculas de mayor tamaño son hidrolizadas por enzimas para que logren penetrar por la membrana celular, dichos compuestos son hidrolizados desde compuestos polímeros hasta monómeros.
- Fase II: Acidogénesis. Las bacterias fermentativas fermentan dentro de los monómeros como azúcares, aminoácidos, alcoholes y ésteres; la mayoría de veces sólo una pequeña parte de la energía potencial en la materia orgánica es destinada para la fermentación. Alrededor del 80 % es excretada fuera de las células, a su vez el resultado final de la conversión es sustratos neutros en ácidos con tendencia fuerte.
- Fase III: Acetogénesis. Aparecen las bacterias acetogénicas que toman los sustratos como ácidos propiónico, butírico y lo introducen a sus células oxidándolos convirtiéndolo en ácido acético y gas hidrógenos excretados por la célula. En conclusión una parte proviene de la Acetogénesis y la otra de la Acidogénesis.
- Fase IV: Metanogénesis. Los compuestos de ácido acético, gas hidrógeno son tomados por las bacterias metanogénicas y metabolizadas a metano (CH₄) que al mismo tiempo es excretada por la célula.

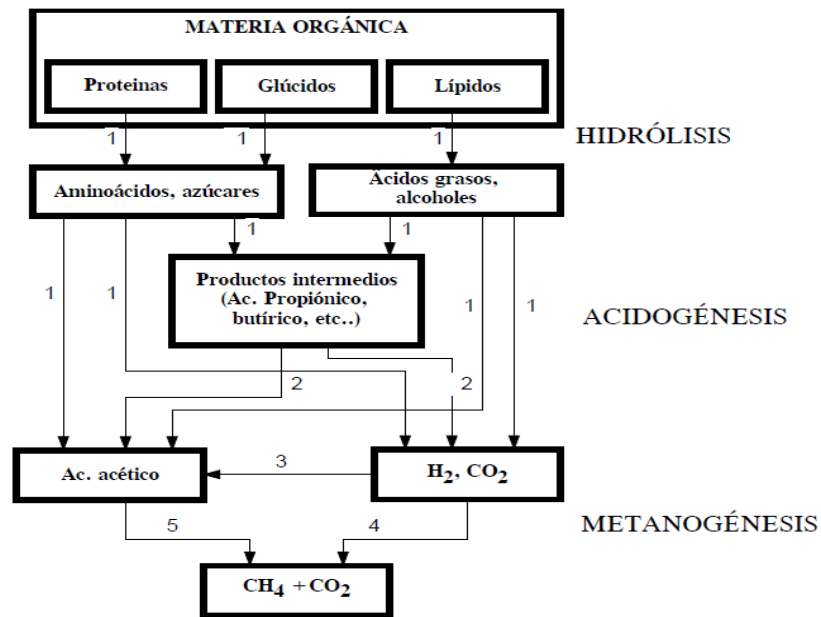


Fig. 1.1. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas: 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas; 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas; 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 1. Fases de un reactor anaeróbico.

Fuente: Castells, 2005.

Los reactores anaerobios que procesan el agua residual, producen subproductos como ser el biogás y también fertilizante orgánico el cual puede ser aprovechado para la producción de cultivos orgánicos. Sin embargo, para que el sistema funcione óptimamente es necesario monitorear parámetros como: sólidos volátiles, demanda química o biológica de oxígeno entre otros para la producción de biogás. Por consiguiente la Escuela Agrícola Panamericana, con una población aproximada de 1,200 estudiantes y con un parque agroindustrial de empresas lácteas y cárnicas a nivel educativo-productivo proveen de un espacio único para la investigación en cuanto al tratamiento de aguas residuales y planteamiento de alternativas con su debida implementación a fin de contrarrestar los efectos de las actividades humanas y agroindustriales y a su vez aprovechar los residuos para la producción de energía.

Las aguas residuales son aguas que provienen del abastecimiento del área residencial, agropecuaria, industrial la cual ha sido modificada por el uso en función de un beneficio de cierta población (Mara 1976). Las aguas residuales se pueden clasificar de acuerdo a su origen en aguas domésticas e industriales. Las aguas domésticas son las que provienen de hogares, utilizadas con fines higiénicos o de residuos de humanos en distintos lugares, como edificios, centros comerciales, públicos y privados. Las aguas residuales industriales son el residuo de los procesos en las fábricas de todo tipo, las cuales por lo general ingresan al sistema de alcantarillado y posteriormente son depositadas en los cuerpos de agua con o sin tratamiento previo, en donde pueden constituirse en un foco de contaminación por su alto contenido de fosfatos (Jørgensen, 1983). Algunos contaminantes encontrados en las aguas residuales al momento de su tratamiento son

sólidos en suspensión, materia orgánica compuesta por proteínas, carbohidratos, grasas; patógenos, nutrientes como el fósforo, carbono; contaminantes prioritarios como son los compuestos inorgánicos y orgánicos, materia orgánica refractoria, metales pesados y sólidos inorgánicos disueltos (De Cámara, 2004).

En Zamorano, el agua residual proveniente de los procesos realizados en las plantas agroindustriales y los residuos domésticos. El agua residual se dirige a un sistema de lagunas facultativas 1 y 2, con volúmenes de 4251 m³ para la laguna 1 y 5503 m³ para la laguna 2 (Martinez, 2008), donde se realiza el proceso de depuración en condiciones anaerobias desaprovechando el uso que se les pueda dar a los gases que éstas emanan a la atmósfera. De esta forma el objetivo del presente estudio consistió en determinar el potencial energético de producción de biogás en kW/h de diferentes proporciones de mezcla de residuos agrícolas con aguas residuales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio consiste en el aprovechamiento de aguas residuales combinadas con residuos orgánicos como fuente de biogás para la producción energética. Éste se realizó en un laboratorio de campo montado en la Carrera de Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, en la Escuela Agrícola Panamericana. Se utilizaron muestras recolectadas de aguas residuales de la laguna facultativa No. 1 y residuos agrícolas provenientes de las instalaciones de compostera, ambos ubicados en Zona 2, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

Para el estudio se utilizaron biodigestores de tipo discontinuo o Batch que son tanques herméticos donde el biogás es producido en un medio anaeróbico, sin presencia de oxígeno. Éste tipo de biodigestores se basan en la teoría todo adentro, todo afuera, donde se carga de materia orgánica al principio y la descarga (biol) se efectúa una vez que se ha terminado de producir el gas metano (Botero, 1987).

Para el montaje de los biodigestores se contó con 8 recipientes de policarbonato, con capacidad volumétrica de 19.2 litros (5 galones). Se llenó cada uno al 70 % de su capacidad, y se los selló de manera hermética con goma epóxica para evitar la fuga de biogás. Las mezclas para cada tratamiento fueron: tratamiento 1- 80 % agua residual con 20 % residuos agrícolas (cáscaras de naranja y olotes); mientras que para el tratamiento 2, se utilizó 50 % de ambos sustratos. Se realizaron cuatro repeticiones de cada mezcla para reducir el error estadístico.

Cuadro 2. Porcentaje de sustratos y cantidad de repeticiones.

N	Agua residual (%)	Abono Orgánico (%)	Total (%)
4	80	20	100
4	50	50	100

Previo al llenado de los recipientes se evaluó el pH con la intención neutralizar pH del sistema, ya que éste debe oscilar entre 6.5 y 7.5 para que la producción de metano sea óptima, de lo contrario podría producirse metano en menor cantidad (Señer, 2005). Tras la evaluación del pH se obtuvo que el rango de pH de cada uno de los tratamientos donde se encontraba dentro de los parámetros permitidos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Datos de pH obtenido pre-sellado de biodigestores.

Tratamiento		R1	R2	R3	R4
1	pH	6.8	7.2	6.8	6.7
2	pH	6.6	7.2	7.0	6.5

Para el presente experimento se consideraron dos temperaturas, la temperatura ambiente promedio diaria y la temperatura promedio diaria de los recipientes. La temperatura promedio diaria se obtuvo de los datos de la estación meteorológica de Zamorano ubicada en Zona 1. Para medir la temperatura de los recipientes conforme transcurría el experimento se utilizó un termómetro electrónico de superficie, donde se mostraba la temperatura de manera digital; este procedimiento se realizó una vez al día por 43 días.

Es necesario tomar en cuenta que la temperatura de la digestión anaerobia puede darse en distintos rangos como: psicrófilo, menor a 20 °C, mesófilo, entre 30 y 40 mientras que el termófilo está entre 40 y 70. Lo que se busca es que se aumente la temperatura ya que es proporcional a la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento de las bacterias y a su vez la producción de biogás.

Para medir el volumen de producción de biogás, se utilizó un manómetro de tubo en forma de “U” construido artesanalmente, en el cual se utilizó aceite de motor 15W-40 (Balseca, 2011). A partir del día quince, se realizaron mediciones diarias de la diferencia de alturas a raíz de la presión que ejercía la producción de biogás sobre la columna de agua (movimiento de la columna de agua hacia un lado del tubo en forma de U).

Posteriormente este dato, diferencial de alturas, fue reemplazado en la ecuación de Bernoulli a fin de hallar la presión ejercida en la columna de agua, para posteriormente calcular el volumen de biogás producido utilizando la ley de gases ideales, asumiendo el comportamiento del biogás como un gas ideal.

Según la Ecuación de Bernoulli:

$$P_1 + DGH + 0.5MV^2 = P_2 + DGH + 0.5MV_1^2 \quad [1]$$

Donde:

P = presión

D = densidad

G = gravedad

H = altura

M = masa

V = velocidad

Según la Ecuación Ley de Gases Ideales:

$$PV = NRT \quad [2]$$

Donde:

P = presión

V = volumen

N = número de moles

R = constante de los gases ideales

T = temperatura

Otro parámetro considerado en el presente estudio fue la relación Carbono/Nitrógeno. De acuerdo a Botero (1987), la relación de C/N óptima para la producción de biogás se encuentra entre los rangos de 20 a 30. De acuerdo a Restrepo (2007), la fórmula para obtener la relación C/N = 30 está dada por la siguiente ecuación:

$$X = \frac{C_n \cdot N_n}{C_c \cdot N_c} \quad [3]$$

Donde:

X = Cantidad del peso rico en carbono, para cada parte de nitrógeno

Nn = % de nitrógeno en el material rico en N

Cn = % de carbono del material rico en N

Nc = % de nitrógeno del material rico en C

Cc = % de carbono del material rico en C

Cuadro 4. Relación C/N de algunos materiales.

Materiales	C/N	%N	%C
Aguas Residuales	11	2.21	24.31
Mazorca de Maíz	101	0.52	52.52
Cáscara de Naranja	18	0.71	12.78

Fuente: Moncayo (2007) y Restrepo (2007).

Estos valores sirvieron para determinar el balance inicial de la relación C/N de cada una de las mezclas utilizadas en el presente estudio. Para la mezcla 1 (80% de aguas residuales y 20% de residuos agrícolas), el balance de C/N fue:

$$\text{Mezcla 1} = \frac{C_n \cdot N_n}{C_c \cdot N_c} \quad [4]$$

$$\text{Mezcla 1} = 13.73 \text{ C/N}$$

Para la mezcla 2 (50% de aguas residuales y 50% de residuos agrícolas), la relación de C/N fue:

Mezcla 2 = _____ [5]

Mezcla 2 = 23.8 C/N

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La recopilación de datos inició a los quince días de montado el sistema, y continuó hasta el momento en el cual la producción de los sistemas fue tan mínima que no se percibió ningún cambio en la columna de aceite. De esta forma el tiempo de retención hidráulica (TRH) dió un valor aproximado a los 43 días. En la gráfica 2, se observa el desplazamiento de la columna de aceite en función de la temperatura diaria y el tiempo de retención hidráulico. Cabe destacar que la temperatura promedio de los recipientes para ambos tratamientos fue mayor a la temperatura ambiente y esto pudo deberse a la actividad microbiana de descomposición de la materia orgánica (Botero, 1987).

Se observó una tendencia positiva ascendente, con temperaturas mayores a 30 °C a partir del día 22. En el día 27 se observó que para el tratamiento 1, (80 % de aguas residuales y 20% de residuo agrícola), que el desplazamiento de la columna de aceite fue mayor a pesar de que la temperatura ambiente se mantuvo similar a los días anteriores.

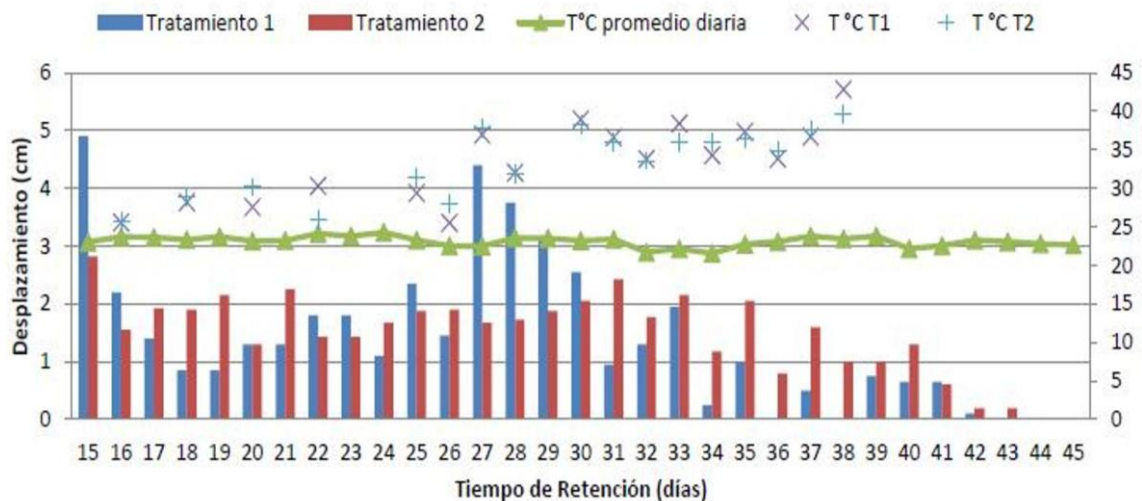


Figura 2. Desplazamiento de la columna de aceite en función del tiempo de retención y de la temperatura ambiente promedio diaria.

A partir del día 30, se observa una disminución en la producción de biogás a pesar que la temperatura de ambos recipientes se mantuvo relativamente constante. Es posible que a pesar que la actividad bacteriana se mantuviese constante, las bacterias ya no tuvieran alimento para digerir y por ende permitir la producción de biogás.

Se utilizó los datos la diferencia de alturas (desplazamiento lineal) en centímetros de cada una de las repeticiones de los tratamientos por día y se reemplazó los valores en la ecuación de Bernoulli y la ecuación universal de los gases ideales, donde se obtuvo los valores citados en la gráfica 2 de producción de biogás total por repetición de cada uno de los tratamientos.

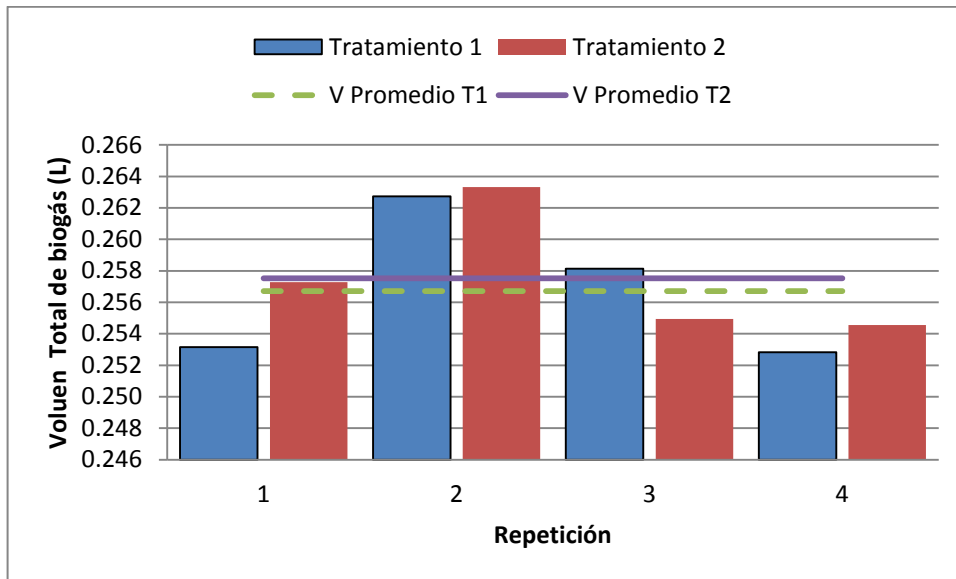


Figura 3. Volumen total de biogás producidos por tratamiento.

En la gráfica anterior se observa que los valores en cuanto a la producción de biogás de la repetición dos fueron mayores en ambos tratamientos con respecto a las demás repeticiones. Sin embargo, todos los recipientes fueron colocados en un lugar con igual acceso a la luz solar, en un mismo nivel de suelo, con igual cantidad de sustrato dependiendo del tratamiento. La variación de la temperatura en este caso pudo deberse a procesos internos de la actividad microbiana en las diferentes fases del proceso anaerobio, las cuales no fueron evaluadas en el presente estudio debido a que no se contó con cromatógrafos de gases que puedan ser utilizados en ensayos de campo y, que permitan un monitoreo de las fases de acidogénesis y acetogénesis (Dinsdale *et al.* 1996).

La producción promedio total de biogás que se obtuvo tras 43 días de retención para el tratamiento 1 por litro de sustrato fue de 24.65 ml/l, y la producción promedio total de biogás para el tratamiento 2 por litro de sustrato fue de 24.71 ml/l. Ambos valores de producción de biogás son similares; sin embargo, dado que hasta el momento final del estudio no se contó con un medidor de la composición de biogás, es posible que el contenido de metano se haya visto comprometido a raíz de una relación C/N baja en el caso del tratamiento 1 (80 % de aguas residuales y 20 % de residuos orgánicos) a diferencia del tratamiento 2, cuya relación C/N se encontraba dentro del rango (20-30) (Botero, 1987).

4. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos sobre la cantidad de biogás producido por litro de la mezcla, se concluye que si se utilizará toda el agua residual contenida en la laguna facultativa No 1 (4,251 m³), éste volumen equivaldría a un volumen diario de producción de biogás aproximado de 105 m³ para ambas mezclas. Donde, tomando en cuenta una eficiencia del motor del 33 % y una composición de biogás del 55% de metano, se podría obtener un total de 19 kW/h de electricidad, siempre y cuando los parámetros óptimos para la producción de biogás sean correctamente balanceados y monitoreados.
- De obtener un biogás que se aproxime al 60 % de composición de metano en ambas mezclas, económicamente hablando, la mezcla 1 (80/20) sería la más adecuada porque el costo de acarreo de material sería menor comparado al de la mezcla 2 (50/50). Sin embargo, no se pudo medir la composición de biogás en el presente estudio debido a que el equipo de medición llegó después de culminado el experimento.
- Si comparamos los datos de producción de biogás por litro de sustrato logrados durante el experimento, con los datos de producción de biogás por litro de sustrato logrados en Dinamarca en el año 1987, 30 ml/l sustrato (Fonts,2007), observamos que los datos de la presente tesis, son aproximados a los datos de Dinamarca. Sin embargo, ya para el año 2000, Dinamarca presentaba un promedio de 41,8 ml biogás/l de sustrato, en donde se puede concluir que todavía queda mucho investigar, a fin de incrementar la eficiencia en cuanto a la producción de biogás a partir de residuos para fines energéticos en Zamorano.

5. RECOMENDACIONES

- Utilizar un aceite 15W-40 porque los cambios físicos o químicos debidos al incremento de la temperatura ambiente son mínimos. Además, de esta forma también se evita la evaporación y es posible controlar la presión manométrica.
- Realizar futuros experimentos de biogás en un ambiente controlado, en donde se pueda controlar la variable temperatura, a fin de realizar un mejor monitoreo de las otras variables y su influencia en el proceso de biodigestión.
- Realizar pruebas de laboratorio al inicio y al final del experimento de manera de comparar el volumen teórico de biogás a producir con el volumen de biogás producido y poder obtener así el error de campo. Este factor de error, posteriormente servirá para determinar futuros valores de producción de biogás tomando en cuenta los valores teóricos.
- Monitorear los procesos internos que ocurren dentro de los biodigestores, como ser la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis a fin de asegurar una producción de metano óptima. Es decir, que la composición de metano en el biogás se aproxime al 60 %.

6. LITERATURA CITADA

Balseca, D.; Cabrera J. 2011. Producción óptima de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café. Proyecto de graduación del programa de ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 20 p.

Brenes, P. 2002. Evaluación físico-química del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Urbanización Cocorí, Cartago. Tesis Lic. Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 88 p.

Botero, R. Preston, T. 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. "Manual para su instalación, operación y utilización". Costa Rica. 19 p.

Castells, X. *et al.* 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana (FUI), Díaz de Santos, 2005. 1228 p.

De Cámara, L. *et al.* 2004. Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias. 45 p.

Dinsdale, R., Hawkes, F., & Hawkes, D. 1996. The Mesophilic and Termophilic Anaerobic Digestion of Coffee Waste and Coffee Grounds. *30* (2), 371-377.

Energy Poverty, How to make modern energy Access universal? Special early excerpt of the World Energy Outlook 2010 for the UN General Assembly on the Millennium Development Goal. OECD/IEA, September 2010. 40 p.

Jørgensen, S.E.; Mitsch, W.J., 1983. Application of Ecological Modelling in Environmental Management, Part B. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam. 439 p.

Moncayo, G. 2010. Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de Biogás. Aqualimpia Beratende Ingenieure. 1ed. Uelzen, Alemania. 720 p.

Martinez, M. 2008. Análisis comparativo de las lagunas de estabilización de la EAP, bajo condiciones anaerobias con fines energéticos. Tesis Lic. Ing. Agr. Tegucigalpa, Honduras, Zamorano. 80 p.

Restrepo R., J. 2007. El ABC de la agricultura orgánica y harina de rocas. 1a ed. Managua, Nicaragua: SIMAS. 262 p.

Sanz J. 2010 Reactores Anaerobios: Tipos y características (en línea) formato PDF. Revisado el 20 de junio de 2011. Disponible en www.cbm.uam.es/jlsanz/docencia/-Master/Documentos/Master%20T-8.pdf

Señer, A. 2005 Obtención de biogás mediante fermentación anaerobia de residuos alimentarios. (en línea) Formato PDF, consultado 15 de junio de 2011. Disponible en <http://www.ainia.es/pdf/asistencia/obtencionbiogas.pdf>

Valerín, K. 2002. Evaluación físico-química y microbiológica del sistema de tratamiento de aguas residuales en la planta Santa María del beneficio F.J. Orlich ubicado en Orosí. Tesis Lic. Ing. En Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 104 p.

Wasser, R. 1995. Tratamiento Anaerobio de aguas residuales del Café. Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). Heredia, Costa Rica. 57 p.