

Evaluación de la producción de metano en el tratamiento de los residuos del café mediante la digestión anaerobia en dos fases

Departamento de Ambiente y Desarrollo

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2013

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación de la producción de metano en el tratamiento de los residuos del café mediante la digestión anaerobia en dos fases

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

Presentado por

Juan Antonio Chinchilla Martínez

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2013

Evaluación de la producción de metano en el tratamiento de los residuos del café mediante la digestión anaerobia en dos fases

Presentado por:

Juan Antonio Chinchilla Martínez

Aprobado:

Victoria Cortés, M.Sc.
Asesora principal

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

Lourdes Espinal, Ing.
Asesora

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

Ingrid Sorto, Ing.
Asesora

Evaluación de la producción de metano en el tratamiento de residuos de café mediante la digestión anaerobia en dos fases

Juan Antonio Chinchilla Martínez

Resumen: La digestión anaerobia en dos fases brinda un impacto positivo en la estabilidad de los grupos de microorganismos involucrados en el proceso de digestión anaerobia. Esta metodología da como resultado una reducción en el tiempo de retención hidráulico y un aumento en la eficiencia de la remoción de la materia orgánica. Se evaluó la eficiencia de la digestión anaerobia en dos fases mediante la comparación del proceso de degradación de residuos del café en reactores anaerobios en una y dos fases. Ambos tipos de reactores fueron operados con cargas de 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 y 5.00 kg SV/m³. Para el montaje de los reactores en una fase y dos fases se utilizó el sistema batch o por lotes inoculados. Para el montaje de la fase hidrolítica-acidogénica del reactor en dos fases se utilizó un tiempo de retención hidráulico de siete días y una carga de 8 kg SV/m³. Se evaluó el efluente del reactor para cargar los reactores metanogénicos. Para la medición del índice de producción de metano se filtró el biogás de los reactores por una solución alcalina de KOH. Se determinó que el índice de producción de metano fue de 0.67 m³CH₄/kg SV. Se comprobó que la carga máxima de operación en los reactores en dos fases es de 2.50 kg SV/m³; cargas superiores a esta provocan fallo en el sistema. Se concluye que la carga óptima de operación es de 2.00 kg SV/m³. Se determinó una reducción de la materia orgánica mayor a 90%.

Palabras clave: Carga óptima de operación, fallo del reactor, índice de producción de metano, reactor en dos fases, tiempo de retención hidráulico.

Abstract: Two phase anaerobic digestion methodology gives a positive impact on the stability of the conditions required for the groups of microorganisms involved in the process. As a result of this methodology, we can obtain a reduction of the hydraulic retention time and high efficiency of organic matter removal. The efficiency of anaerobic digestion in two phases was evaluated by comparing the degradation of coffee residue in one and two phase anaerobic reactors. For both reactors organic loads of 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00 and 5.00 kg SV/m³ were assembled. Inoculate was required for the appropriate operation of one and two phase reactors. The setup of the hydrolytic-acidogenic required a hydraulic retention time of seven days, run with an 8 kg SV/m³ organic load. The effluent from this reactor was analyzed to calculate the organic load needed for the methanogenic reactors setting up. The volume of methane produced within the reactors was obtained by filtering the biogas through an alkaline solution of KOH. The methane index production obtained was 0.67 m³CH₄/kg SV. The maximum operating load in two phase reactors is 2.50 kg SV/m³, values higher than this will be followed by a system failure. It was found that the optimal operation load in the two phase reactor is 2.00 kg SV/m³ which enhances the performance of the methane production. Analysis performed on the reactors outlets shown significant reductions of organic matter, going up to removal rates higher than 90%.

Key words: Hydraulic retention time, methane production index, optimal operation load, system failure, two-phase reactor

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.....	8
4. CONCLUSIONES.....	13
5. RECOMENDACIONES.....	14
6. LITERATURA CITADA.....	15
7. ANEXOS	17

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Variables fisicoquímicas evaluadas en la caracterización de las aguas mieles del café. Zamorano, Honduras. 2013.	8
2. Tabla resumen de las cargas orgánicas evaluadas en reactores anaerobios en una y dos fases. Índice de producción de metano, tiempo de retención hidráulico y remoción de la materia orgánica. Zamorano, Honduras. 2013.....	9
3. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores anaerobios en dos fases. Zamorano, Honduras. 2013	12

Figuras	Página
1. Fases de la digestión anaerobia (Bautista 2010).....	2
2. Diagrama de reactores anaerobios en una y dos fases y caracterización de sustratos entrantes a cada tipo de reactor anaerobio. Zamorano, Honduras. 2013.....	6
3. Cargas orgánicas evaluadas en reactores anaerobios en una y dos fases y número total de reactores evaluados durante la investigación. Zamorano, Honduras. 2013...	6
4. Gráfica de metano acumulado de las cargas orgánicas evaluadas de los reactores anaerobios en una fase e índice de producción de metano de los residuos del café. Zamorano, Honduras. 2013.	9
5. Gráfica de metano acumulado de las cargas orgánicas evaluadas de los reactores anaerobios en dos fases e índice de producción de metano de los residuos del café. Zamorano, Honduras. 2013.	10
6. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 2.00 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	11

1. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 1.00 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	17
2. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 1.50 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	17
3. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 2.50 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	18
4. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 3.00 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	18
5. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 3.50 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	19
6. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 4.00 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	19
7. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 5.00 kg/m ³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.	20

1. INTRODUCCIÓN

Los diseños utilizados para la digestión anaerobia pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor (IDAE 2007). Para fines de este estudio se utilizaron reactores en una y dos fases. Un reactor en dos fases tiene como principio de operación el mantenimiento de dos reactores en serie, donde las etapas requeridas en la producción de biogás son separadas. La separación de las fases se lleva a cabo con el objetivo de optimizar el tamaño del reactor y se reduce el tiempo de retención hidráulico (IDAE 2007).

La degradación anaerobia de la materia orgánica se lleva a cabo por diferentes grupos de microorganismos; donde el subproducto de una fase es la materia prima de la siguiente. La hidrólisis es la primera fase y consiste en la degradación de los polímeros orgánicos complejos donde se originan moléculas más sencillas (Guardia 2012). Estos monómeros enseguida experimentan procesos de formación ácida donde se crean acetatos, propionatos, butiratos y, en menor proporción, anhídrido carbónico e hidrógeno. Los microorganismos que realizan esta actividad pueden ser microorganismos anaerobios estrictos o facultativos; dentro de las funciones más importantes de este grupo de microorganismos es eliminar cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema (Hernández 2001).

Luego de la hidrólisis dan inicio las fases de acidogénesis y acetogénesis, donde actúan microorganismos productores de hidrógeno y dan como resultado del proceso de digestión el ácido acético junto con el CO_2 y el H_2 (Figura 1). En este momento del proceso los microorganismos anaerobios han degradado la mayor parte de la biomasa (Acuña 2002). Los ácidos grasos volátiles que son producto de la fase acetogénica serán utilizados como sustrato durante la siguiente fase. Durante la fase de metanogénesis actúan un amplio grupo de microorganismos anaerobios que convierten los productos de las fases anteriores en metano. Este último grupo de microorganismos son los más delicados y afectados por los siguientes factores: la temperatura, la concentración de sólidos, la mezcla del fango, el pH y los ácidos volátiles (Hernández 2001).

Los residuos agroindustriales son fácilmente degradados en los reactores anaerobios por su alto contenido de materia orgánica y sus altas concentraciones de sólidos volátiles (Bouallagui *et al.* 2005). Entre las mayores limitaciones al utilizar la digestión anaerobia en una sola etapa como tratamiento de estos efluentes se encuentra la tendencia a acidificarse, lo cual disminuye el pH en el reactor e inhibe los microorganismos metanogénicos (Bouallagui *et al.* 2004). Por estas razones, la digestión anaerobia ha sido objeto de investigación para dar tratamiento a diferentes residuos de difícil degradación. Los primeros en proponer la separación física de las diferentes fases de la digestión anaerobia en dos reactores separados fueron Poland y Ghosh (1971), ellos explican que al

realizar la separación de fases se crean condiciones óptimas para cada grupo de microorganismos (Guardia 2012).

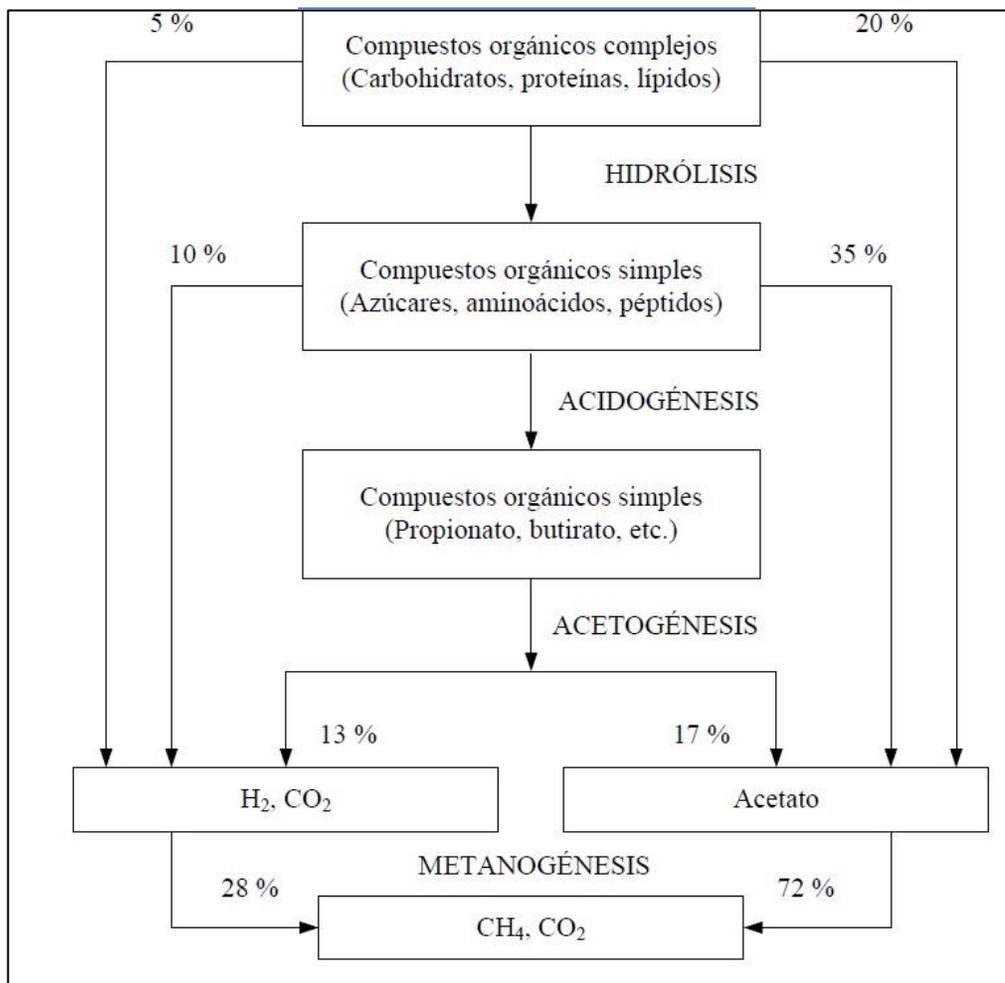


Figura 1. Fases de la digestión anaerobia (Bautista 2010).

Este esquema de tratamiento difásico, utilizado en la degradación de varios tipos de residuos orgánicos, puede proveer las siguientes ventajas en comparación con el realizado en un mismo reactor: el aumento en la eficiencia de la eliminación de la contaminación orgánica, una mayor estabilidad del proceso, una reducción en el tiempo de retención hidráulico, una mayor resistencia a los compuestos inhibitorios y el tamponamiento de la acidificación. Debido a estas razones, la digestión anaerobia en dos fases puede ofrecer ventajas significativas en el tratamiento de las aguas residuales de despulpe generadas por el beneficiado húmedo de café (Guardia 2012). Guardia (2012) concluye que el tratamiento anaerobio en dos fases es un método apropiado para tratar este tipo de agua residual. A pesar de ello, la digestión anaerobia en dos fases no se ha aplicado eficientemente para degradar estas aguas residuales, las cuales son, generalmente, descargadas a los cauces de aguas superficiales sin tratamiento previo. Por tanto, se valora que esta investigación tiene importancia y actualidad.

El primer reactor se utiliza para la producción de ácidos grasos volátiles y el segundo reactor para la producción de metano. Esta configuración vence las limitaciones del método convencional de la digestión anaerobia, ya que, facilita el control y optimiza el proceso (Ghosh 1991). A su vez permite la selección y enriquecimiento de los diferentes grupos de microorganismos en cada reactor por separado, aumenta la estabilidad del proceso por un mejor control de la fase acidogénica, previene la sobrecarga y la inhibición por los compuestos tóxicos. Por otro lado, el primer reactor actúa como un amortiguador del pH a las poblaciones metanogénicas del segundo reactor (Solera *et al.* 2002).

Los productos resultantes de la fase acidogénica son muy importantes para el adecuado funcionamiento de la digestión anaerobia. En esta etapa juegan un papel importante algunos parámetros del funcionamiento del reactor, entre los cuales están la carga orgánica, la estabilidad y la eficiencia del reactor (Guardia 2012).

El funcionamiento del reactor metanogénico puede ser afectado por el tipo de sustrato a tratar y las concentraciones elevadas de los compuestos inhibidores. Un reactor anaerobio que experimente condiciones de sobrecarga orgánica y la presencia de compuestos inhibitorios, tiene un impacto directo en el desempeño de los microorganismos metanogénicos, los cuales no pueden eliminar el hidrógeno ni los ácidos grasos volátiles producidos, lo cual provoca la disminución del pH y afecta la producción de metano (Fukuzaki *et al.* 1990).

Durante el proceso del beneficio de café húmedo un gran volumen de residuos sólidos y líquidos son generados, entre ellos la pulpa y las aguas mieles. Estos residuos poseen una elevada carga orgánica, acidez y sólidos sedimentables (Quintero y Rondón 2012). Las aguas mieles son un sustrato de difícil degradación anaerobia debido a su bajos valores de pH, con un ámbito de tres a siete según su grado de acidificación, lo que provoca un fallo en el reactor debido a la muerte de las microorganismos metanogénicos (Méndez 2003). Entonces la fase limitante de la digestión anaerobia es la metanogénesis. Los microorganismos fermentativos acidifican el sustrato a una velocidad ocho veces más rápida que el consumo de los ácidos grasos por los microorganismos metanogénicos. Lo anterior conduce a la acumulación de los ácidos grasos volátiles en el reactor, el pH disminuye y como consecuencia los ácidos grasos volátiles pueden ser muy tóxicos y lleva al reactor al punto de fallo (Deng *et al.* 2007).

En diferentes beneficios húmedos de café se utilizan las aguas mieles para la producción de biogás neutralizando el pH con productos alcalinizantes (Acuña 2002). Las principales desventajas del uso de alcalinizantes se resumen en el elevado costo de neutralizar el pH con sulfato de calcio y la reducción de la vida útil del reactor por la sedimentación de carbonato de calcio (Méndez 2003). El presente estudio está enfocado en el análisis de un método alternativo de tratamiento de las aguas mieles del café. El estudio de Calzada *et al.* (1984) ha demostrado que el tiempo de retención hidráulica de las aguas mieles del café son reducidos sustancialmente cuando las fases de acidogénesis y metanogénesis son contraladas por separado.

El presente estudio tiene como objetivo la evaluación de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de los residuos de café, se determinó en forma adicional el potencial de la producción de metano con este sustrato. Se evaluaron las cargas orgánicas máximas de operación para los reactores anaerobios en una y dos fases, también se comparó el desempeño de ambos procesos. Adicionalmente se realizó la selección de parámetros óptimos de operación para los reactores en dos fases, fundamentado al TRH, la productividad de metano y la carga orgánica aplicada. Finalmente se evaluó la eficiencia de la remoción de la materia orgánica mediante los procesos de digestión anaerobia aplicados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó a escala de laboratorio en las instalaciones del Departamento de Ambiente y Desarrollo. Se caracterizó el residuo y se evaluó la degradación del mismo haciendo uso de reactores anaerobios en una y dos fases.

Muestreo de sustratos. Para el montaje de los reactores, se utilizaron aguas mieles y pulpa de café obtenidas de los productores de café de Honduras (COMSA Café Orgánico Marcala S.A. de C.V.). Además, se utilizó el efluente de los digestores ubicados en Zona II de la EAP como inóculo del reactor metanogénico. Se empleó agua de una laguna de estabilización como inóculo de microorganismos facultativos requeridos en la fase hidrolítica-acidogénica del reactor en dos fases.

Caracterización y análisis realizados. El sustrato fue analizado cada 15 días para determinar la concentración de los parámetros requeridos en el funcionamiento de los reactores. Estos son la demanda química de oxígeno (DQO), la temperatura, los sólidos totales, los sólidos volátiles y el pH. Las actividades de ensayo se realizaron en el laboratorio de calidad de agua del Departamento de Ambiente y Desarrollo. Los análisis del sustrato se realizaron para evaluar las posibles variaciones de degradación química en la concentración de materia orgánica durante el estudio.

Temperatura y pH. La estimación de temperatura y pH se realizó con el Multi-Parameter Testr 35 Series. **Sólidos Totales y Volátiles.** 2540 B. Sólidos totales secados a 103-105°C y 2540 E. Sólidos volátiles sometidos a ignición a 550°C (Standard Methods 2005). **Demanda Química de Oxígeno (DQO).** Método 8000. “Los resultados en mg/L DQO se definen como el mg de O₂ consumido por litro de muestra en las condiciones de este procedimiento” (HACH 2007).

Implementación de reactores anaerobios y condiciones de operación. Se utilizaron sistemas por lote para los reactores en una y dos fases, que consisten en frascos herméticos discontinuos donde el biogás es producido en un medio anaeróbico y que son alimentados con el sustrato una sola vez para la evaluación del proceso anaerobio. La descarga se efectúa cuando concluye el proceso de producción de biogás (Cabrera y Balseca 2012). El reactor utilizó una botella de suero sencilla, el cual se alimentó con el inóculo y el sustrato del estudio. Las botellas se sellaron con un tapón de goma y cápsulas de aluminio para crear condiciones anaeróbicas. Una vez selladas, se colocaron en una incubadora a 35 °C.

Montaje de reactores en una y dos fases. Los reactores de una fase se alimentaron con la carga orgánica que se indica en el diseño del experimento en reactores batch de 250 ml

(Figura 2). El volumen restante del reactor se completó con biol para inocular los reactores con microorganismos metanogénicos.

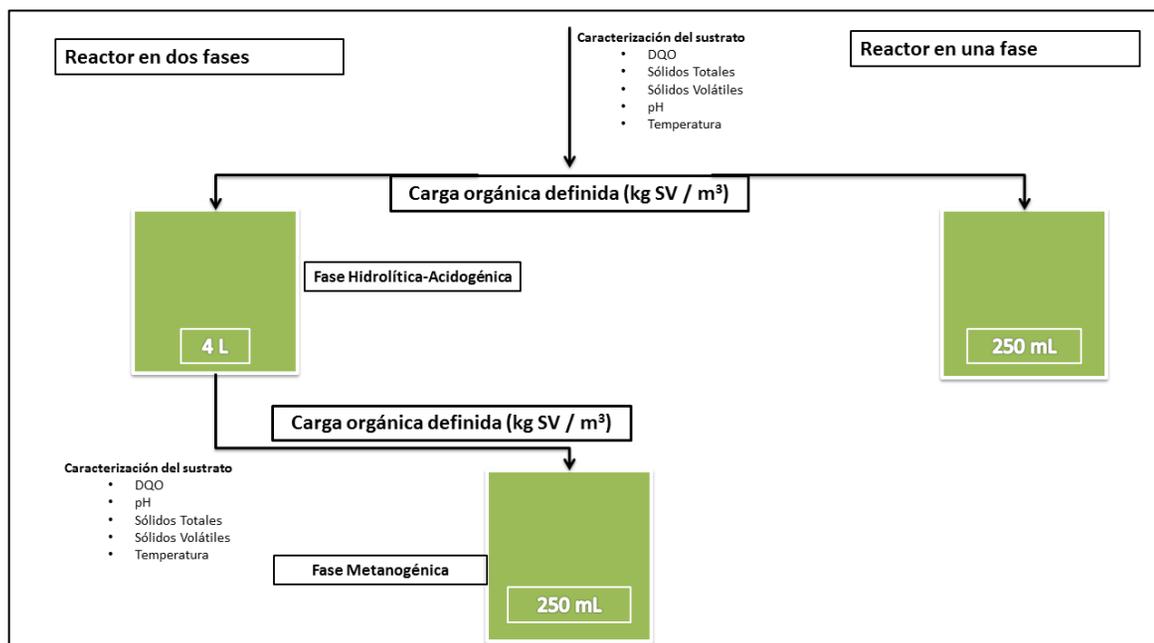


Figura 2. Diagrama de reactores anaerobios en una y dos fases y caracterización de sustratos entrantes a cada tipo de reactor anaerobio. Zamorano, Honduras. 2013.

Para la primera unidad del reactor en dos fases, donde se llevó a cabo la fase de hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis, se utilizó un reactor de cuatro litros que sirvió de fermentador, donde los complejos orgánicos se degradaron a ácidos orgánicos volátiles. La fase metanogénica del reactor en dos fases se llevó a cabo en reactores batch de 250 ml (Figura 2). El efluente del reactor hidrolítico-acidogénico se caracterizó para alimentar los reactores metanogénicos con las cargas evaluadas. (Figura 3)

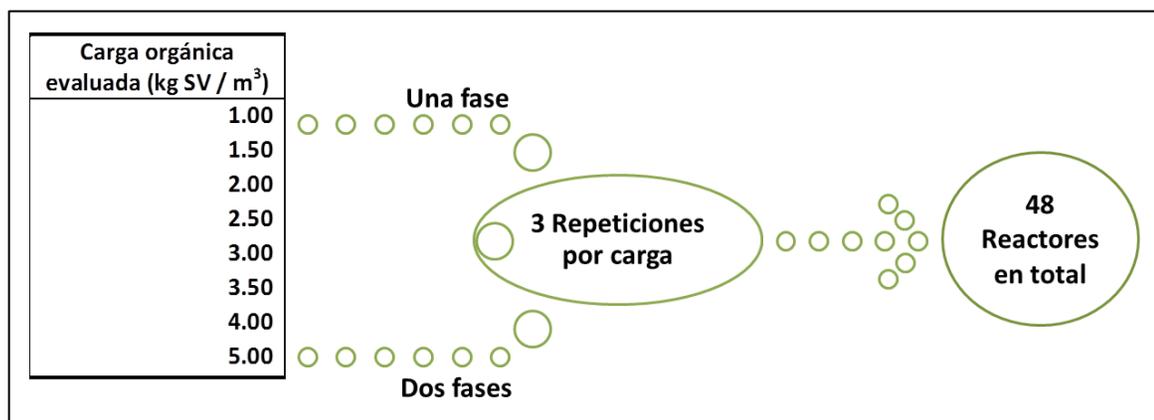


Figura 3. Cargas orgánicas evaluadas en reactores anaerobios en una y dos fases y número total de reactores evaluados durante la investigación. Zamorano, Honduras. 2013.

Aplicación de cargas orgánicas a los reactores. La dosificación del experimento se fundamentó en la carga orgánica aplicada medida en términos de la cantidad de los sólidos volátiles presentes. Se utilizó el volumen necesario de la muestra para llegar a la concentración deseada. Para cada reactor alimentado con una carga orgánica determinada, se realizaron tres repeticiones. Así mismo se añadió al estudio el análisis de un reactor base (blanco) y un reactor alimentado con un compuesto estándar (de concentración y composición conocida) para evaluar el desempeño del ensayo (Figura 3). Las cargas estudiadas fueron 1 mg/ml, 1.5 mg/ml, 2 mg/ml, 2.5 mg/ml, 3 mg/ml, 3.5 mg/ml, 4 mg/ml y 5 mg/ml. (Figura 3)

Medición de metano producido. Para realizar la medición del índice de metano se utilizó una solución básica de hidróxido de potasio para filtrar el biogás. Cuando el biogás pasa por esa solución el dióxido de carbono se convierte en carbonatos y se absorbe en el líquido. Sólo el metano pasa a través de la solución, por lo tanto un volumen equivalente es impulsado fuera de la botella. Este líquido desplazado se midió en una pipeta graduada (Bordeux *et al.* 2004). Esta medición se realizó cada tres días hasta que cada reactor dejó de producir metano.

Evaluación del efluente. Se realizaron análisis de demanda química de oxígeno (DQO) en el sustrato entrante a cada reactor y en el efluente final. Esto se realizó para determinar la eficiencia del sistema para la remoción de carga orgánica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después del análisis realizado en intervalos de 15 días, se determinó que los datos recolectados están dentro de los ámbitos normales de las aguas mieles, como lo demostraron Acuña (2002), Méndez (2003) y CENICAFE (2011). Dentro de la caracterización se determinó que los sólidos volátiles de las aguas mieles eran muy bajos, imposibilitando el uso de este sustrato para el montaje de los reactores mientras utiliza la carga orgánica como variable determinante. Los valores de pH obtenidos pueden provocar condiciones adversas para el desarrollo de microorganismos metanogénicos, debido a que se obtuvieron valores ácidos fuera del ámbito de operación óptimo de la fase metanogénica (Cuadro 1). Se procedió a incrementar la carga orgánica de las aguas mieles con pulpa de café, se elevó los valores conforme al diseño experimental.

Cuadro 1. Variables fisicoquímicas evaluadas en la caracterización de las aguas mieles del café. Zamorano, Honduras. 2013.

Variable	Caracterización del sustrato			
	Rango	Media	Máximo	Mínimo
DQO (mg/L)	9,700 - 13,780	10,945	13,780	9,700
ST (mg/L)	3,912 - 5,240	4,401	5,240	3,912
SV (mg/L)	2,152 - 4,016	3,114	4,016	2,152
pH	4.79 - 5.28	5.28	5.66	4.79
Temperatura (°C)	22.04 - 25.00	24.04	25.00	22.80

Índice de producción de metano en reactores de una fase. Las curvas de metano acumulado obtenidas de los reactores en una fase denotan un comportamiento forzado en la producción de metano provocado por los bajos valores de pH en el sustrato como lo comprobó Calzada *et al.* (1984) y Guardia (2012) (Figura 4). Cargas menores a 2.50 kg SV/m³ en los reactores en una fase causan lenta asimilación del sustrato, mientras que cargas mayores a 3.00 kg SV/m³ causan fallo en el sistema anaerobio metanogénico. Lo anterior se debe a que los microorganismos metanogénicos no pueden asimilar los acetatos producidos en la fase de acidogénesis y acetogénesis, esto provocó una disminución del pH y la inhibición de estos. En consecuencia, se obtuvo que el tiempo de retención hidráulica de cargas menores a 2.50 kg SV/m³ se encuentra en el ámbito de 30 y 40 días, mientras que para cargas mayores a 3.00 kg SV/m³ se requiere un período mayor a 50 días. El índice de producción de metano promedio obtenido fue de 0.67 m³CH₄/kg SV. Este valor se calculó al analizar los datos de los reactores operados con carga

orgánica menor a 3.00 kg SV/m³ debido a que, cargas orgánicas mayores a esta no expresaron su máxima conversión de sólidos volátiles en metano por verificarse la falla en el sistema (Cuadro 2).

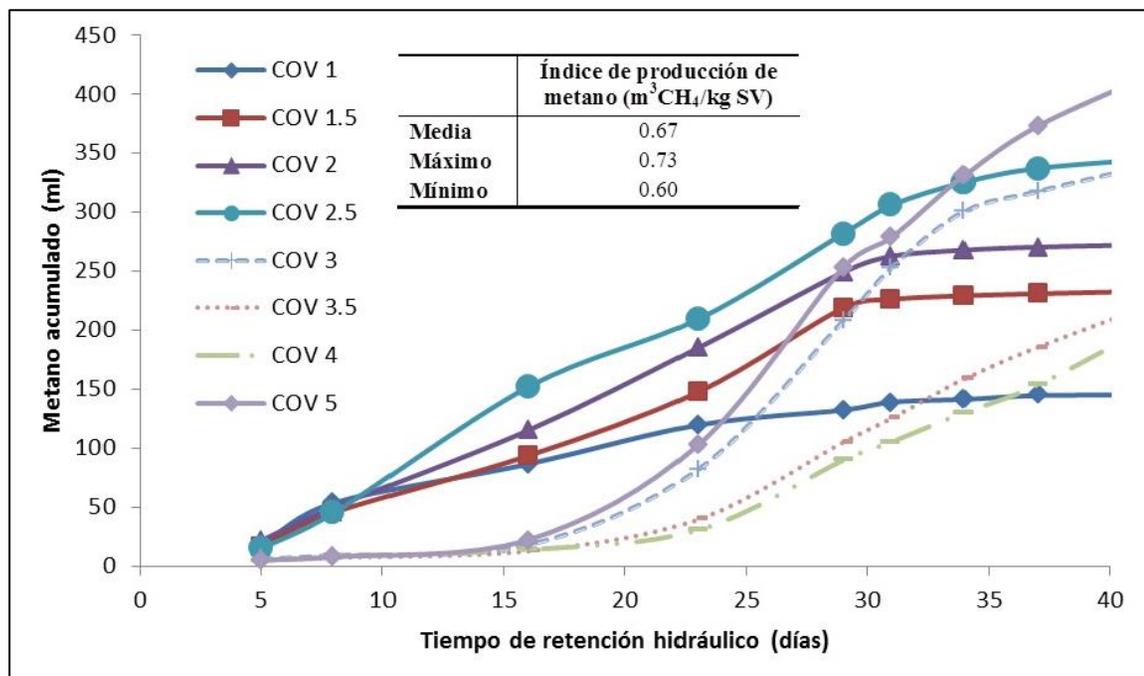


Figura 4. Gráfica de metano acumulado de las cargas orgánicas evaluadas de los reactores anaerobios en una fase e índice de producción de metano de los residuos del café. Zamorano, Honduras. 2013.

Cuadro 2. Tabla resumen de las cargas orgánicas evaluadas en reactores anaerobios en una y dos fases. Índice de producción de metano, tiempo de retención hidráulico y remoción de la materia orgánica. Zamorano, Honduras. 2013.

Carga orgánica (kg SV/m ³)	IPM (m ³ CH ₄ /kg SV)		TRH (días)		% Remoción DQO	
	1 Fase	2 Fases	1 Fase	1 Fase	1 Fase	2 Fases
1.00	0.730	0.623	29	19	81	91
1.50	0.710	0.618	32	21	83	94
2.00	0.690	0.614	35	25	80	97
2.50	0.707	0.697	37	30	90	99
3.00	0.692	0.598	>50	>50	79	96
3.50	0.478	0.443	>50	>50	61	72
4.00	0.432	0.319	>50	>50	60	78
5.00	0.515	0.176	>50	>50	62	68

Índice de producción de metano en reactores en dos fases. Los reactores en dos fases presentan el mismo comportamiento que los reactores en una fase con respecto a la asimilación de las cargas orgánicas. Según los resultados de los reactores con cargas mayores a 3.50 kg SV/m^3 se puede inferir una lenta producción de metano en el sistema debido al incremento en la concentración de los acetatos, como resultado la actividad metanogénica es inhibida. Según los resultados de las cargas de 4.00 kg SV/m^3 y 5.00 kg SV/m^3 se presencié fallo total del sistema sin que se logren alcanzar las condiciones para la fase metanogénica (Figura 5). Este comportamiento permite predecir que el reactor operado bajo condiciones de alimentación continua no producirá metano, ya que las características ácidas del sustrato y la sobrecarga del reactor no permitirán el desarrollo de un ambiente apropiado para los microorganismos metanogénicos. El índice de producción de metano promedio para estos reactores fue de $0.64 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$, valor que concuerda con el obtenido en los reactores de una fase. Al igual que el caso anterior, para realizar este cálculo solamente se tomaron en cuenta los reactores con carga menor de 3.00 kg SV/m^3 ya que expresaron su máxima conversión de sólidos volátiles en metano. Cargas orgánicas mayores de 3.00 kg SV/m^3 afectan directamente la resiliencia del sistema anaerobio en dos fases (Cuadro 2).

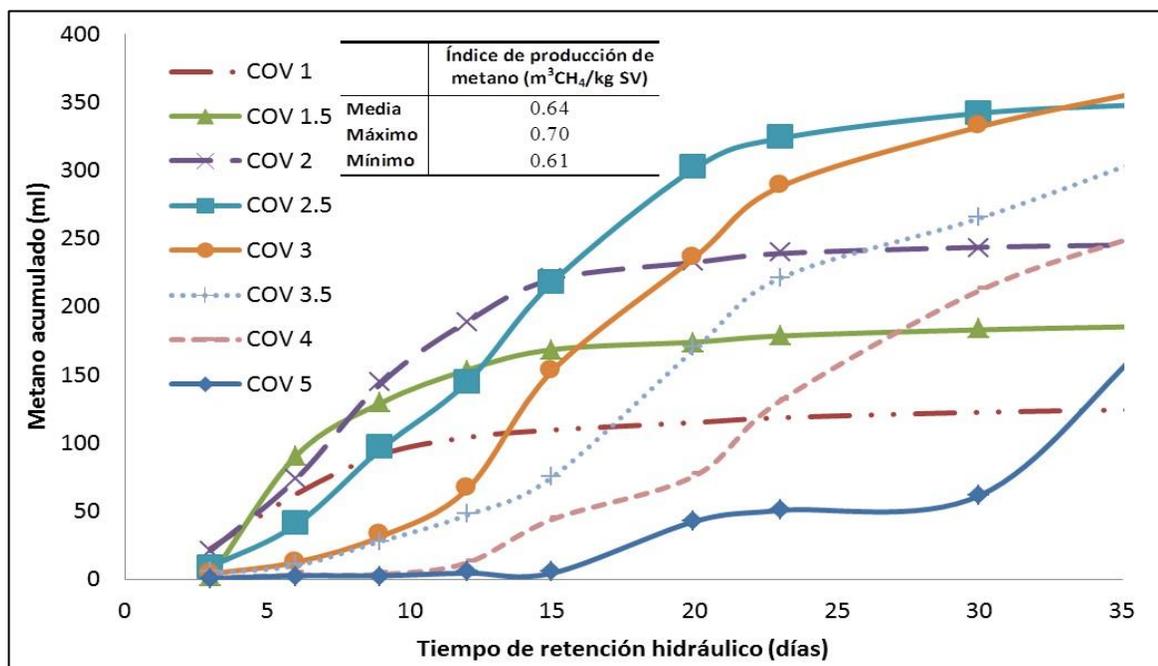


Figura 5. Gráfica de metano acumulado de las cargas orgánicas evaluadas de los reactores anaerobios en dos fases e índice de producción de metano de los residuos del café. Zamorano, Honduras. 2013.

Comparación del desempeño de los reactores. Al comparar los procesos de digestión anaerobia en una y dos fases se obtuvo que la producción de metano se dio en un tiempo inferior en el reactor de dos fases. Esto denota tiempos de retención inferiores y por lo tanto un tamaño inferior de un reactor a nivel de campo (Figura 6). En los reactores metanogénicos la conversión de metano fue casi inmediata luego de añadir el efluente

proveniente de la fase de hidrólisis-acidogénesis. En los reactores en una fase la producción de metano es más lenta ya que los microorganismos de cada fase carecen de un ambiente óptimo para su máxima eficiencia.

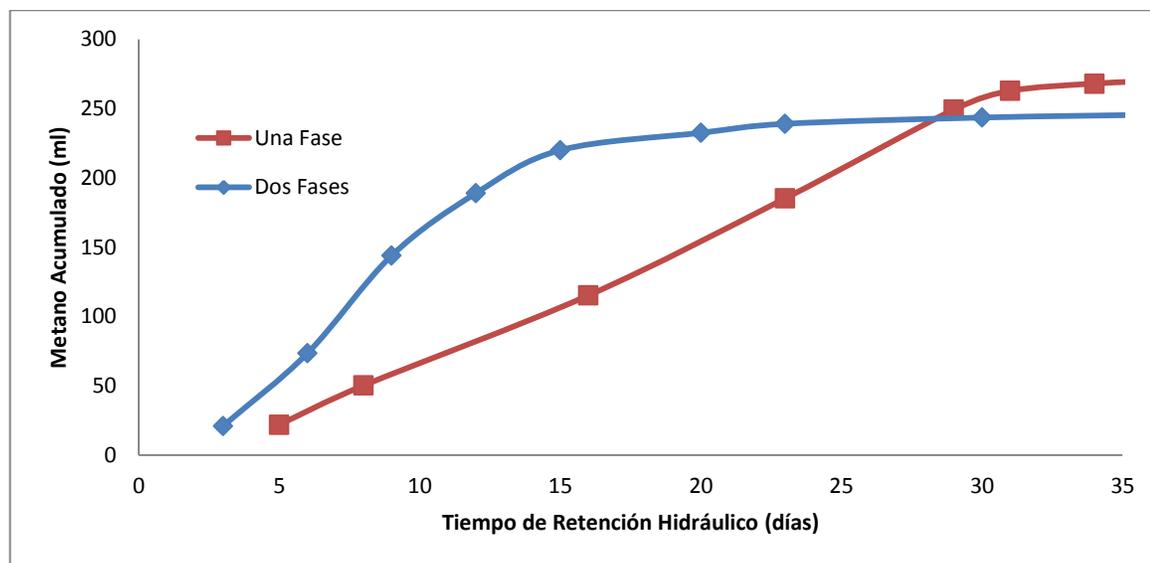


Figura 6. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 2.00 kg/m^3 en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.

Parámetros óptimos de operación en los reactores de dos fases. La operación de los reactores se fundamenta en la selección de la carga orgánica aplicada, el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el volumen de metano producido. Según los resultados de las curvas de metano acumulado, se muestra el periodo que se requiere para obtener la máxima conversión de los SV en metano y permite la selección del TRH. Los parámetros óptimos de operación son definidos según los requerimientos del usuario. Estos pueden girar en torno a la máxima productividad de metano, uso eficiente del área de construcción (tamaño del reactor) o una máxima remoción de materia orgánica.

Para determinar los parámetros óptimos de operación se excluyeron del cálculo todos los reactores anaerobios con las cargas orgánicas mayores a 3.00 kg SV/m^3 , pues no se logró una conversión total de sólidos volátiles en metano (Cuadro 3). Para fines del estudio se determinó una combinación de tiempo de retención hidráulica y producción de metano; ya que se tomó en cuenta los parámetros antes mencionados se determinó una carga óptima de operación de 2.00 kg SV/m^3 al 80% de producción de metano en relación a los sólidos volátiles alimentados. Los resultados obtenidos de esta combinación son un TRH de 21.6 días, esto tiene como resultado un menor tamaño de reactor requerido para las cargas orgánicas y una productividad de metano mayor. Lo anterior es congruente con el uso eficiente del área de construcción lo cual facilita la operación del proceso de digestión anaerobia.

Cuadro 3. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores anaerobios en dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.

Carga orgánica (kgSV/m ³)	Producción de metano acumulado							
	100%		90%		80%		75%	
	TRH (día)	CH ₄ (ml)	TRH (día)	CH ₄ (ml)	TRH (día)	CH ₄ (ml)	TRH (día)	CH ₄ (ml)
1.00	19	104.0	17.1	93.60	15.2	83.20	14.25	78.00
1.50	22	167.0	19.8	150.3	17.6	133.6	16.5	125.3
2.00	27	220.0	24.3	198.0	21.6	176.0	20.25	165.0
2.50	37	301.5	33.3	271.4	29.6	241.2	27.75	226.1

Eficiencia de remoción de materia orgánica mediante reactores anaerobios. Luego de analizar los resultados en el efluente de los reactores en dos fases, se observó una mayor remoción de la materia orgánica, lo que concuerda las investigaciones de Guarida (2012) y Hernandez (2001). La remoción de los reactores en dos fases fue mayor a 90% mientras que para los reactores en una fase fue mayor a 80% (Cuadro 2). Aún bajo condiciones de fallo los reactores tienen una eficiencia mayor a 60% de remoción de materia orgánica en ambos tipos de reactor anaerobio.

4. CONCLUSIONES

- Los reactores que operaron bajo condiciones de fallo, particularmente debido a una sobrecarga de materia orgánica, fueron excluidos del cálculo del IPM. Lo anterior se debe a que la conversión de los sólidos volátiles en metano resultó incompleta. El promedio del IPM obtenido con cargas menores a 3.0 kg SV/m^3 fue de $0.67 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$. Este valor es independiente del proceso anaerobio aplicado e inherente a las características del sustrato.
- En el estudio se determinó una carga máxima de operación de 2.50 kg SV/m^3 , que se dedujo por la incompleta conversión de los SV en metano. Esta puede ser menor al operar reactores continuos, ya que la alimentación continua de un sustrato con características agresivas (pH ácido), no permitirá el alcance de las condiciones apropiadas para el desarrollo de la fase metanogénica.
- Al comparar los procesos de la digestión en una y dos fases se tiene que los reactores en dos fases inician la producción de metano en un período inferior al de una fase, reflejándose en la reducción del TRH y por lo tanto un menor tamaño de reactor a nivel de campo.
- La condición de operación óptima del proceso se fundamenta en la selección de carga orgánica que proporcione una mayor producción de metano a un menor TRH, lo cual dará como resultado el uso de un reactor de menor tamaño. Luego de los resultados obtenidos, se determinó que la carga óptima de operación es de 2.00 kg SV/m^3 , con un TRH de 21.6 días para una conversión de 80% de los SV en metano.
- El proceso en dos fases presentó una mayor remoción de materia orgánica en comparación a los reactores en una fase, obteniéndose reducciones mayores a 90% para dos fases y de 80% para los reactores de una fase.

5. RECOMENDACIONES

- Utilizar reactores anaerobios en dos fases para tratar diferentes tipos de sustratos de difícil tratamiento diferentes a los residuos de café en futuros estudios.
- Montar un reactor anaerobio continuo en dos fases a nivel de laboratorio para ampliar la investigación y hacer una proyección de diseño a nivel de campo.
- Considerar la combinación de diferentes tipos de reactores anaerobios para la separación física de las diferentes fases de degradación anaeróbica. Por ejemplo: Reactor anaerobio de flujo ascendente–Reactor anaerobio de flujo ascendente; Reactor anaerobio de flujo ascendente–Flujo continuo.
- Combinar diferentes técnicas para hacer más eficiente el proceso anaerobio en dos fases, como la implementación de área superficial dentro del reactor metanogénico para creación de biofilm o añadir biochar al sustrato para incrementar la producción de metano y reducir el TRH.

6. LITERATURA CITADA

Acuña, F. 2002. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de café en el beneficio de Coopronaranjo R.L. Tesis. Ing. Biotecnología. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 65p.

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

Balseca, D. y Cabrera, J. 2011. Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café. Tesis. Ing. Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana. 27p.

Bautista, A. 2010. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos en Estelí, Nicaragua. Tesis. Ing. Químico. Lleganés, España. Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. 67p.

Bordeaux, F., P. Smith y A. Wilkie. 2004. An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. Gainesville, United States. Soil and water science department, University of Florida. ScienceDirect, bioresource technology (92): 103-109.

Calzada, J., J. Menchú, F. Micheo, E. Porres, C. Rolz y A. Yurrita. 1984. Biogas production from coffee pulp juice: one- and two-phase systems. Guatemala, Guatemala. Central American Research Institute for Industry (ICAITI). Agricultural wastes (9): 217-230.

Boullagui, H., M. Torrijos, J. Godon, R. Molletta, R. Cheikh, Y. Touhami, J. Delgenes y M. Hamdi. 2004. Two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Bioreactors performance. J. Biochem. Eng (21): 193-197.

Bouallagui, H., Y. Touhami, R. Cheikh y M. Hamdi. 2005. Bioreactor Performance in anaerobic digestion of fruit and vegetables wastes. Process Biochem. (40): 989-995.

Deng, Z., W. Wang, C. Wei y C. Wu. 2007. Characteristics of high-sulfate wastewater treatment by two-phase anaerobic digestion process with Jet-loop anaerobic fluidized bed. Guangzhou, China. School of environmental science and engineering, South China University of Technology. ScienceDirect, journal of environmental sciences (19): 264-270.

Fukuzaki, S., N. Nishio, M. Shobayashi y S. Nagai. 1990. Inhibition of the fermentation of propionate to methane by hydrogen, acetate and propionate. *Appl. Environ. Microbiol.* 56 (3): 719-723.

Ghosh, S. 1991. Pilot-Scale demonstration of two-phase anaerobic digestion of activated sludge. *Water Sci. Technol.* (23): 1179-1188.

Guardia, Y. 2012. Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café. Madrid, España. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. 161p.

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

Hernández, A. 2001. Depuración y Desinfección de Aguas Residuales (Quinta ed.) Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. p. 935-1013.

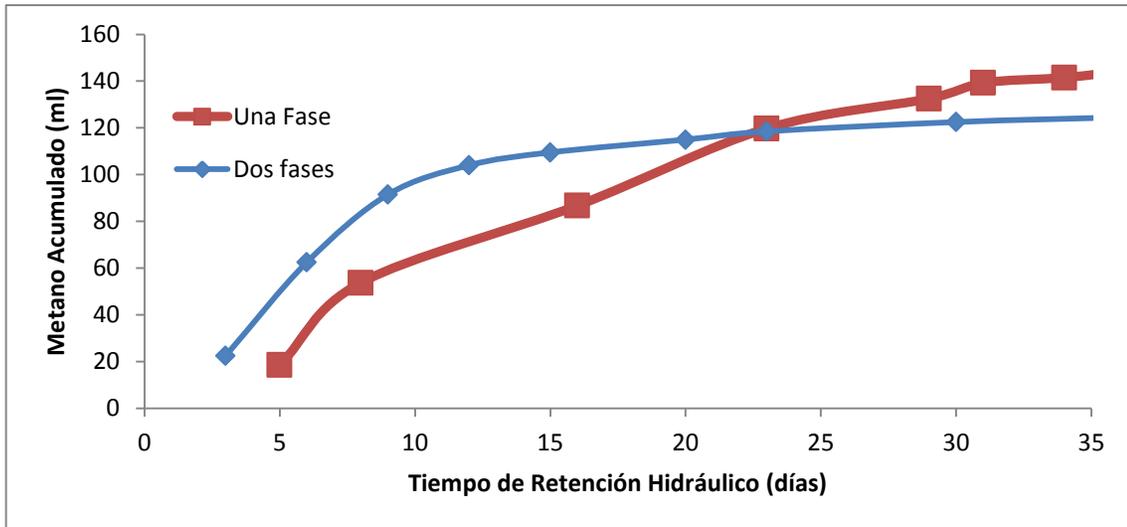
Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE) 2007. Biomasa digestores Anaerobios. Tecnologías de la digestión anaerobio. Madrid, España. 30p.

Méndez, R. 2003. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de beneficiado de café en Coopronaranjo R.L. Tesis. Ing. Biotecnología. Cartago, Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 89p.

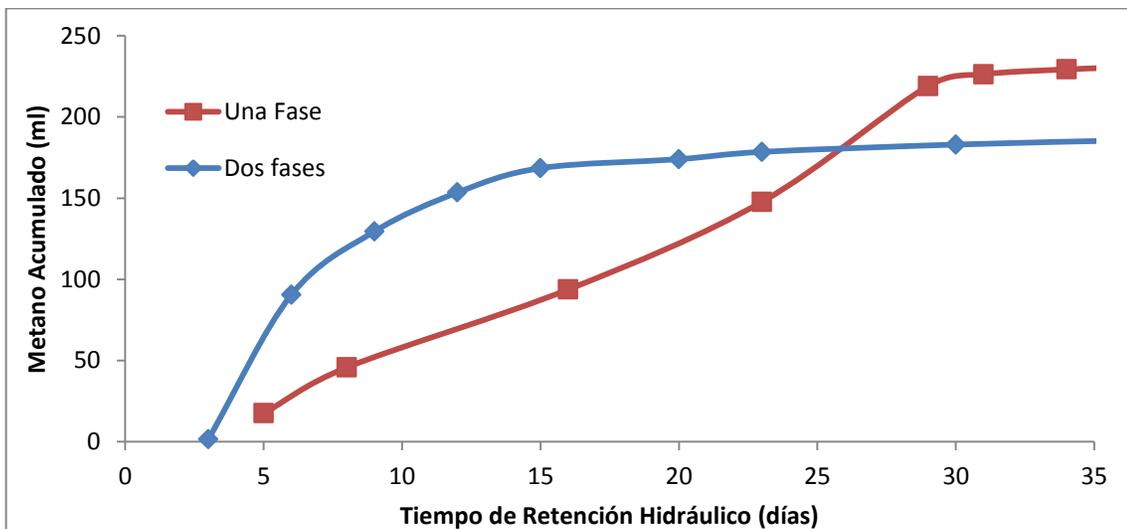
Quintero, M. y Y. Rondón. 2012. Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del mucílago de café utilizando lodo de estiércol de cerdo como inóculo. Ing. Químico. Bucaramanga, Bogotá, Colombia. Universidad Industrial de Santander. 59p.

Solera, R., L. Romero y D. Sales. 2002. The evolution of biomass in a two-phase anaerobic treatment process during star-up. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 16 (1): 25-29.

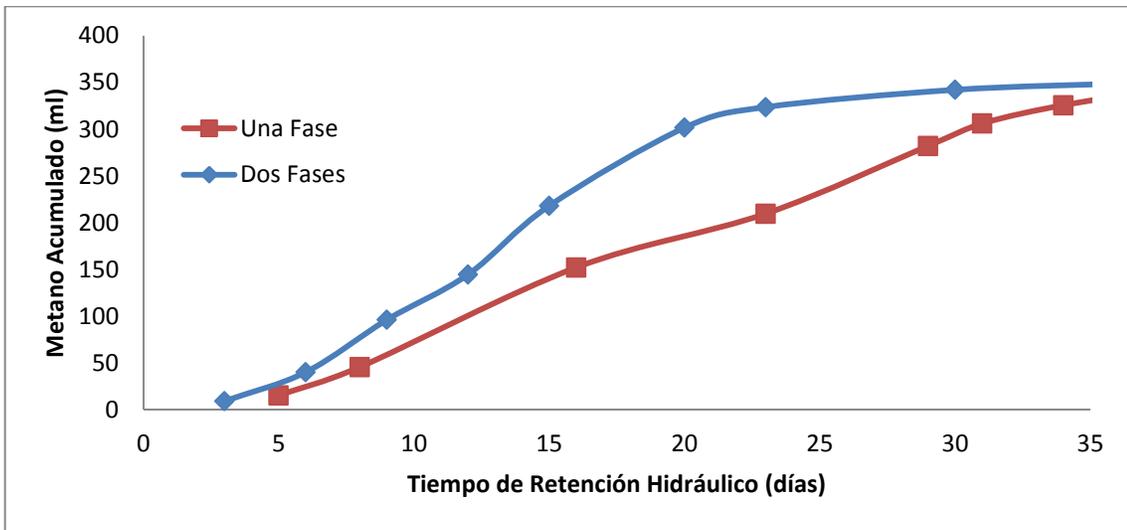
7. ANEXOS



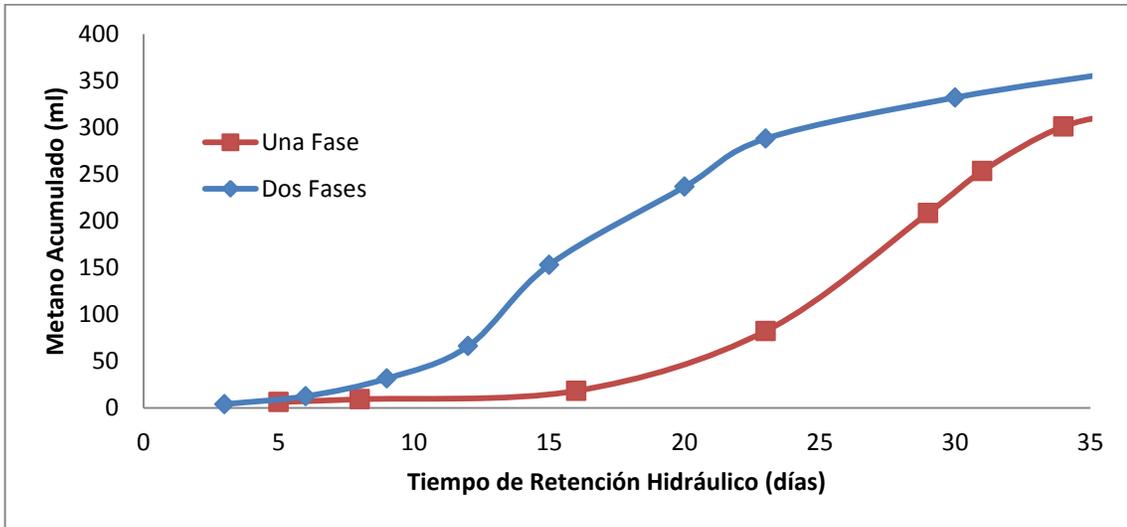
Anexo 1. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 1.00 kg/m³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.



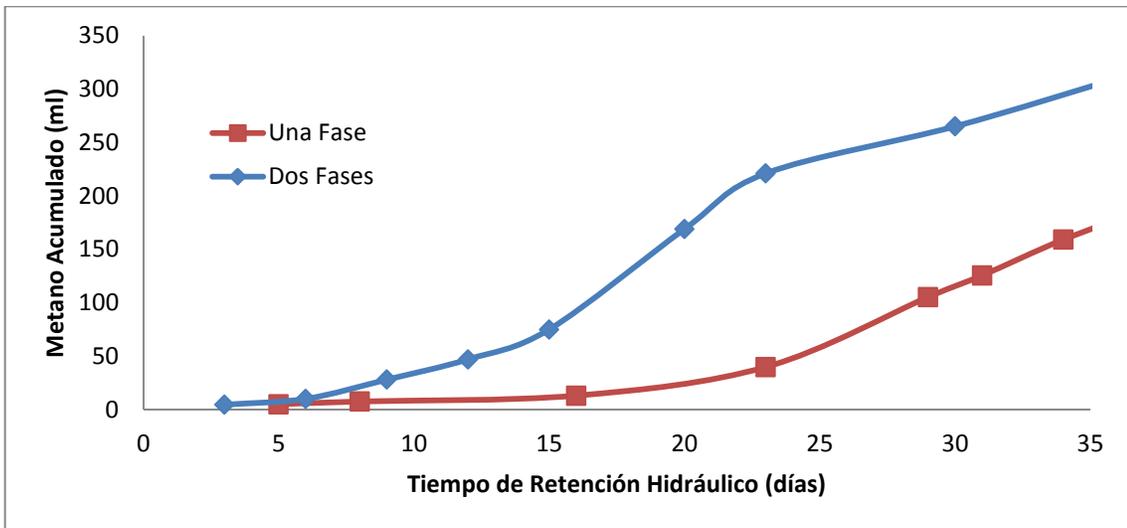
Anexo 2. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 1.50 kg/m³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.



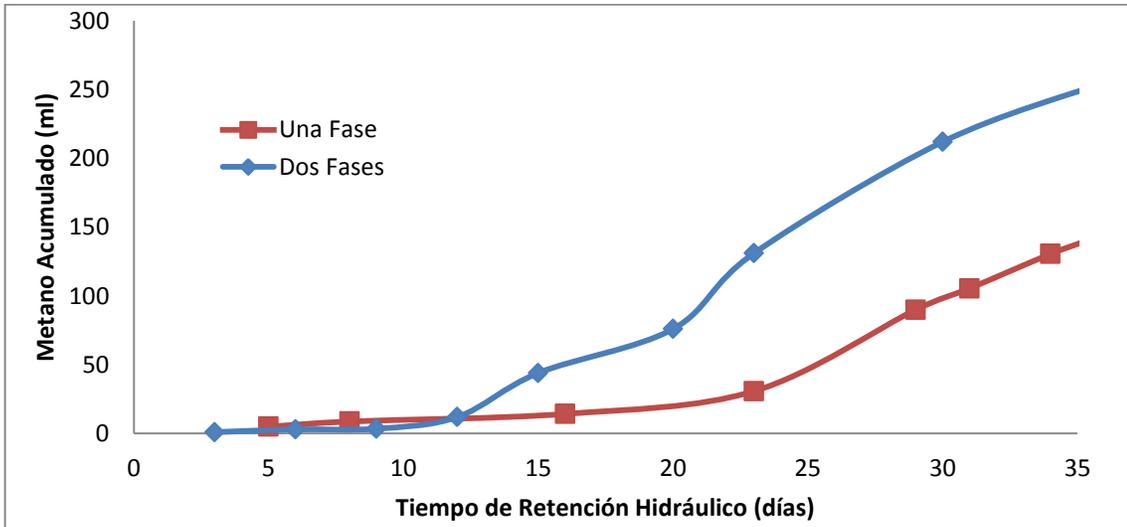
Anexo 3. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 2.50 kg/m^3 en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.



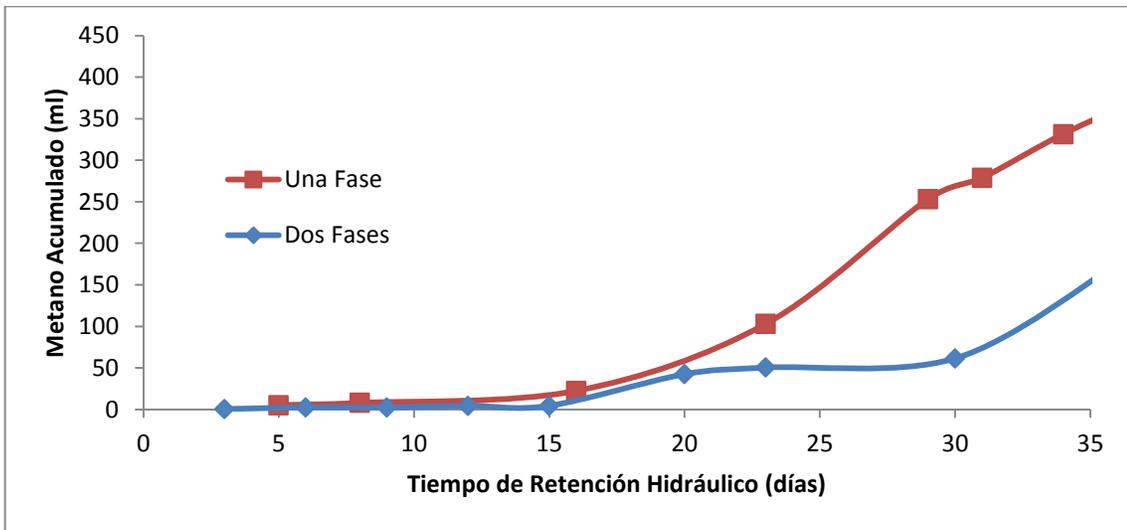
Anexo 4. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 3.00 kg/m^3 en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.



Anexo 5. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 3.50 kg/m³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.



Anexo 6. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 4.00 kg/m³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.



Anexo 7. Gráfica comparativa de metano acumulado de carga orgánica de 5.00 kg/m³ en reactores anaerobios en una y dos fases. Zamorano, Honduras. 2013.