

# **Productividad de metano a partir de residuos de cultivo de maíz y frijol**

**Cindy Michelle Ventura Irías**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**

**Honduras**

Noviembre, 2014

ZAMORANO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Productividad de metano a partir de residuos de cultivo de maíz y frijol**

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

Presentado por:

**Cindy Michelle Ventura Irías**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2014

# Productividad de metano a partir de residuos de cultivo de maíz y frijol

Presentado por:

Cindy Michelle Ventura Irías

Aprobado:

---

Victoria Cortés, M.Sc.  
Asesora Principal

---

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

---

Lourdes Espinal, Ing.  
Asesora

---

Raúl H. Zelaya, Ph.D.  
Decano Académico

---

Ingrid Sorto, Ing.  
Asesora

## **Productividad de metano a partir de los residuos de cultivos de maíz y frijol.**

**Cindy Michelle Ventura Irías**

**Resumen.** Se midió la productividad de metano a partir de los residuos de maíz y frijol, procesando los sustratos por separado y en codigestión. El Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria, encargado de la producción de cultivos, reporta la generación de aproximadamente 15,000 kg/ ha de residuo de maíz y una poca cantidad de residuos de frijol que son picados y reincorporados al suelo. Esta actividad no permite aprovechar el potencial energético de estos residuos, por lo que este estudio tiene como objetivo estimar la cantidad de metano que puede producirse a partir de la digestión anaerobia de estos cultivos en Zamorano, lo que permitirá estimar el recurso disponible para generar energía eléctrica y la producción de un bioabono que pueda ser reintegrado al suelo. Se determinó la productividad de metano de los residuos por separado y en codigestión con porcentajes de 30:70, 50:50 y 70:30 de maíz y frijol respectivamente. Ambos sustratos pueden utilizarse para la producción de metano en forma individual o en codigestión, sin embargo la mejor productividad fue registrada para el residuo de maíz operado a una carga orgánica de 4 kg SV/m<sup>3</sup> dando como resultado un IPM de 0.288 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/ kg SV. La cantidad de metano que puede ser producida utilizando la totalidad de los residuos de maíz es 416,569 m<sup>3</sup> que al ser transformados en energía mediante un generador de electricidad con 33% de eficiencia puede proporcionar 1,518 MWh de energía que podría contribuir en un 30% al consumo energético anual de la EAP.

**Palabras clave:** Biodigestor, carga orgánica, codigestión, digestión anaerobia, índice de producción de metano, potencial bioquímico de metano.

**Abstract.** Productivity of methane was measured from corn and beans residues, processed separately and together. The Department of Science and Production, responsible for crop production, reports about 15,000 kg/ha of corn residue and lesser amount of beans that are normally left in the field and turend over. This activity does not use the potential energy of the waste, so this study aims to estimate the amount of methane that can be produced from the anaerobic digestion of these crops in Zamorano, allowing for an estimate of the resource available for energy electricity and the production of fertilizer. Methane production from corn and bean residues was determined separately and together with percentages of 30:70, 50:50 and 70:30 respectively. Both substrates can be used for the production of methane individually or together, however the best productivity was recorded for corn residue operated at an organic load of 4 kg VS / m<sup>3</sup> resulting IPM 0.288 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / kg SV. The amount of methane that can be produced using all of the corn residue is 416.569 m<sup>3</sup> to be transformed into energy by a generator with 33% efficiency can provide 1,518 MWh of energy that could contribute 30% from the annual energy consumption from the EAP.

**Key words:** Anaerobic digestion, biochemical methane production, codigestion, digester, methane production index, organic load.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>4</b>
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>4 CONCLUSIONES.....</b>	<b>19</b>
<b>5 RECOMENDACIONES.....</b>	<b>20</b>
<b>6 LITERATURA CITADA .....</b>	<b>21</b>
<b>7 ANEXOS .....</b>	<b>23</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Comparación del Índice de Producción de Metano (IPM) de los sustratos por separado: maíz y frijol.....	15
2. Comparación entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de los sustratos en codigestión.....	15
3. Comparación entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de cada sustrato y de codigestión.....	16
4. Volumen de metano producido por kg de SV removidos.....	17

Figuras	Página
1. Muestreo en forma diagonal.....	4
2. Montaje del método para cuantificar el metano.....	9
3. Índice de Producción de Metano de los reactores batch con maíz como sustrato.....	12
4. Índice de Producción de Metano de los reactores batch con frijol como sustrato.....	13
5. Comparación entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de las diferentes fases con su respectiva carga orgánica.....	16

Anexos	Página
1. Lugares de producción de cultivos de maíz y frijol.....	23
2. Índice de producción de metano de los reactores batch con mezcla de 70% de maíz y 30% de frijol respecto a su carga orgánica.....	24
3. Índice de producción de metano de los reactores batch con mezcla de 50% de maíz y 50% de frijol respecto a su carga orgánica.....	24
4. Índice de producción de metano de los reactores batch con mezcla de 30% de maíz y 70% de frijol respecto a su carga orgánica.....	25
5. Comparación del Índice de Producción de Metano (IPM) entre los sustratos de maíz y frijol.....	25
6. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de maíz.....	26
7. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de frijol.....	26

8.	Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de mezcla de maíz al 70% y frijol al 30%.....	26
9.	Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de mezcla de maíz al 50% y frijol al 50%.....	27
10.	Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de mezcla de maíz al 30% y frijol al 70%.....	27
11.	Datos iniciales y finales de cada residuo y las mezclas.....	28
12.	Recolección de muestras. ....	29
13.	Montaje de los biorreactores batch.....	29

# 1. INTRODUCCIÓN

La digestión anaeróbica de la biomasa es un proceso natural de la biodegradación de la materia orgánica realizada por microorganismos específicos que transforman un sustrato biodegradable en biogás y además un efluente que puede ser utilizado como bioabono llamado biol. La digestión anaerobia tiene aplicaciones tanto civiles como industriales alrededor del mundo como una tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos y la generación de energía. (Roati *et al.* 2012).

El biogás está compuesto por diversos gases, entre ellos los más importantes son el dióxido de carbono, el metano y el sulfuro de hidrógeno. La cantidad de estos gases depende de las características del sustrato que se someta a la digestión anaerobia y de las condiciones de operación del proceso. Por tanto se puede mejorar artificialmente la producción de biogás para al mismo tiempo maximizar la producción de nuestro gas de preferencia. (Roati *et al.* 2012).

El proceso de degradación de la digestión anaeróbica comienza con la fase hidrolítica en donde se rompen las cadenas de compuestos orgánicos complejos dando como resultado compuestos solubles más sencillos. Luego estos compuestos pasan por otros tres procesos más que son: fermentación o acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis donde al final se produce metano a partir de ácido acético, Hidrógeno (H<sub>2</sub>) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) (Varnero 2011). La adición de largas cadenas de compuestos hidrocarbonados, por ejemplo: materiales que son ricos en grasas, pueden ayudar a mejorar la calidad del biogás, pero con precaución de que las cantidades no sean tan grandes para evitar la acidez. El contenido de metano aumenta entre mayor sea el número de átomos de Carbono en el sustrato. (Deublein y Steinhauer 2008).

Asimismo, el rendimiento de metano prácticamente alcanzable depende de muchos factores como la composición, el tamaño de grano, y las proporciones de los sustratos asignadas, en la degradabilidad de la biomasa microbiana, el contenido de materia seca, materia seca orgánica y la relación de los nutrientes entre sí. Además, los parámetros de la tecnología de la fermentación son de importancia, por ejemplo, el número de etapas, la temperatura, el tiempo de residencia del sustrato en el biorreactor, el tipo y la frecuencia de la mezcla del sustrato, y la cantidad y la frecuencia de la adición de sustrato. (Deublein y Steinhauer 2008).

El ensayo del Potencial Bioquímico de Metano (BMP) desarrollado en el Laboratorio de Gestión de Residuos Agrícolas de la Universidad Estatal de Iowa, es una herramienta utilizada en la determinación del nivel de degradabilidad de un sustrato bajo condiciones

anaerobias y la capacidad de conversión del carbono orgánico presente en metano. (Moody *et al.* 2009) El laboratorio de Energía Renovable del departamento de Ambiente y Desarrollo en conjunto con la Universidad de Florida, desarrolló una adaptación del ensayo de BMP a las condiciones existentes en el laboratorio, reportando los resultados obtenidos como Índice de Producción de Metano (IPM).

En Zamorano se producen aproximadamente 900,000 kg de maíz y 100,000 kg de frijol al año distribuidos entre 100-120 ha de maíz y 25-40 ha de frijol en diferentes lotes distribuidos alrededor del Campus como: El Pivote (San Nicolás), Zona II, Monte Redondo y diversas terrazas, véase mapa del lugar en figura 1 (Pineda 2014). Los residuos que se generan en esta producción de maíz y frijol se pican con la cosechadora reduciendo su tamaño y se riegan en el campo después de la cosecha. Según lo expresan los encargados de esta producción, el Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria, se concluye que no están aprovechando todas las bondades que se pueden extraer a partir de estos residuos.

Hasta el momento no se han realizado estudios de productividad de metano a partir de residuos de maíz y frijol en Zamorano, pero se han realizado estudios con otros sustratos orgánicos como: las aguas residuales procedentes de la granja porcina (Cevallos e Hidalgo 2013), aguas mieles y pulpa de café (Chinchilla 2013) y aguas rojas originadas en la sala de cosecha de la Planta de Cárnicos (López y De Arco 2013); dando como resultado un Índice de Producción de metano (IPM) de  $0.37 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ ,  $0.67 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  y  $0.49 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  respectivamente.

También existen investigaciones en Italia (Roati *et al.* 2012) utilizando estiércol de cerdos, vacas, aves y conejos donde se obtuvo un rango de IPM de  $0.2\text{-}0.3 \text{ m}^3/\text{kg SV}$  y en cultivos de arroz y se produjo  $0.2 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ . De igual manera, en Irlanda (Nizami *et al.* 2011) se trabajó con pastos y se concluyó que el metano obtenido es un biocombustible sostenible para el transporte, con un buen equilibrio de la energía y un importante potencial para la viabilidad económica. El rango de IPM obtenido fue de  $0.35\text{-}0.49 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ .

La carencia de este tipo de estudios en Zamorano, nos limita el conocimiento del potencial energético de estos residuos, haciendo notar que la degradación sin control de estos cultivos genera emisiones de diferentes gases de efecto invernadero que no son capturadas. El presente estudio contribuirá al conocimiento del uso de los residuos como fuente energética renovable, aprovechando su potencial energético.

Los beneficios de implementar un proyecto de esta naturaleza radican en la cantidad de metano proveniente de la degradación de los residuos de maíz y frijol, que se podrá convertir a energía eléctrica para ser usada en los sistemas de riego, además del aprovechamiento del bioabono como un enriquecedor de nutrientes a los suelos cultivados.

Para lograr esto se cuantificó la cantidad de residuos de maíz y frijol producidos por hectárea, determinando la producción de metano mediante la aplicación del ensayo de IPM. Adicionalmente, se integró la variable de codigestión o mezcla de residuos, para

determinar la combinación óptima de rastrojo de maíz y frijol que contribuya al incremento de la productividad de metano a diferentes cargas de materia orgánica. Finalmente, se estimó la proporción del sustrato que se transformó a metano, mediante la reducción de la concentración de materia orgánica en los diferentes reactores.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización del estudio.** La Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano localizada en el Valle de Yegüare, departamento de Francisco Morazán, se ha caracterizado por ser uno de los destacados productores de maíz y frijol en la zona. La toma de muestras se realizó utilizando la cosecha de maíz y frijol de la primera siembra.

**Recolección de muestras.** La medición del índice de producción de metano se realizó a partir de los residuos de dos diferentes cultivos: maíz (*zea mays*) y frijol (*phaseolus vulgaris*). Para la obtención de estas muestras primero se seleccionó una porción cuadrada de tierra de aproximadamente 500,000 m<sup>2</sup> y para tener representatividad se hizo un muestreo diagonal de esa área, georreferenciando 5 diferentes puntos, siendo primero los extremos y finalmente el centro, repitiendo el mismo proceso en ambos cultivos.

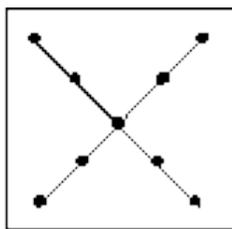


Figura 1. Muestreo en forma diagonal.  
Fuente: INEA 2001.

Los residuos de maíz se obtuvieron de la producción en Zona II y los residuos de frijol se obtuvieron de la producción del Proyecto de Investigación del Frijol (PIF) en las parcelas demostrativas frente a Ganado lechero. Dichos residuos se llevaron al laboratorio del Departamento de Ambiente y Desarrollo, donde fueron codificados con la fecha y lugar de recolección para realizar los análisis pertinentes.

**Estimación de cultivo y residuo por hectárea.** Para la cuantificación del volumen de producción de los cultivos y sus respectivos residuos se realizó una entrevista al Director de la Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria, el Dr. Renán Pineda, el cuál facilitó la información acerca del volumen de residuos respecto a la producción anual en Zamorano para maíz. Sin embargo, no se cuenta con datos cuantificados para los residuos de frijol por tanto, se hicieron los cálculos según (García *et al.* 2003) y (Ayala *et al.* 2006).

**Preparación de las muestras.** Inicialmente las muestras puntuales fueron mezcladas para obtener una muestra compuesta representativa del sitio de estudio, seguidamente los residuos fueron expuestos al sol para ser secados y evitar formación de hongos por exceso de humedad y acelerado deterioro de las muestras. Luego fueron triturados y colocados en bolsas con cierre hermético para determinar los sólidos totales y volátiles mediante los métodos 2540 B y 2540 E (Standard Methods 2005) y continuar así el montaje de los biorreactores.

**Montaje y determinación del Índice de Producción de Metano (IPM) en biorreactores por lotes o batch.** En esta investigación se utilizó el biorreactor discontinuo o BATCH (por lotes), para cuantificar el potencial de producción de metano de los sustratos. Este biorreactor, es un biodigestor a pequeña escala, el cual es alimentado solamente al inicio del proceso. Este potencial de producción de metano se expresó en volumen de metano producido por una cantidad de materia orgánica agregada al proceso (Cevallos e Hidalgo 2013).

Para el montaje se utilizaron frascos herméticos de 250 mL que aseguran el proceso de anaerobiosis. Los organismos metanogénicos son necesarios para la digestión anaerobia, por lo tanto para que existan los mismos, el efluente de los biodigestores de zona II (biol) se utiliza como inóculo en cada biorreactor. Este biol fue caracterizado antes de ser usado, para la medición de pH se utilizó el Orion Star A211 y para la determinación de sólidos los métodos: 2540 B y 2540 E (Standard Methods 2005).

Debido a la posible influencia de diferentes variables en la digestión anaeróbica como la temperatura, para no tener variaciones en los datos, se trabajó bajo condiciones controladas utilizando una incubadora a una temperatura de 35°C. (Varnero 2011). Para el montaje de cada biorreactor batch se hizo un cálculo de la porción de muestra y biol que se necesita para llenar 200 ml de los 250 ml que tiene cada frasco. Se seleccionaron 4 diferentes cargas orgánicas de acuerdo a la literatura. A continuación se presenta el cálculo para el volumen de muestra necesario para la aplicación de las cargas orgánicas anteriormente elegidas (Cevallos e Hidalgo 2013):

$$\text{Muestra (g)} = \frac{V \times CO}{ST \times SV} \quad [1]$$

Donde V: Volumen del biorreactor mL  
CO: Carga Orgánica (mg/mL)  
ST: Sólidos Totales (%)  
SV: Sólidos Volátiles (%)

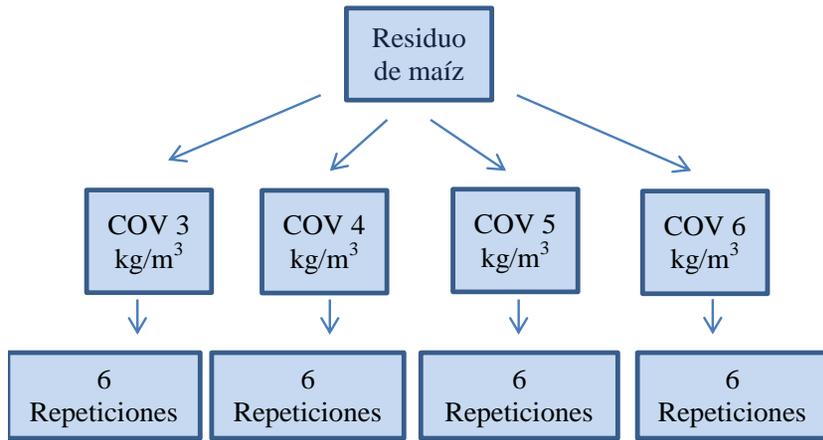
El cálculo de la Ecuación 1 se estimó en función de la cantidad de los sólidos volátiles que contiene cada sustrato y la tasa de carga en kg SV/m<sup>3</sup> (Cevallos e Hidalgo 2003).

**Diseño Experimental.** En la investigación se realizaron cinco tratamientos con cuatro cargas orgánicas y seis repeticiones cada uno, mediante dos montajes, siendo en total 120 muestras. El primer montaje fueron dos tratamientos puros (maíz y frijol respectivamente)

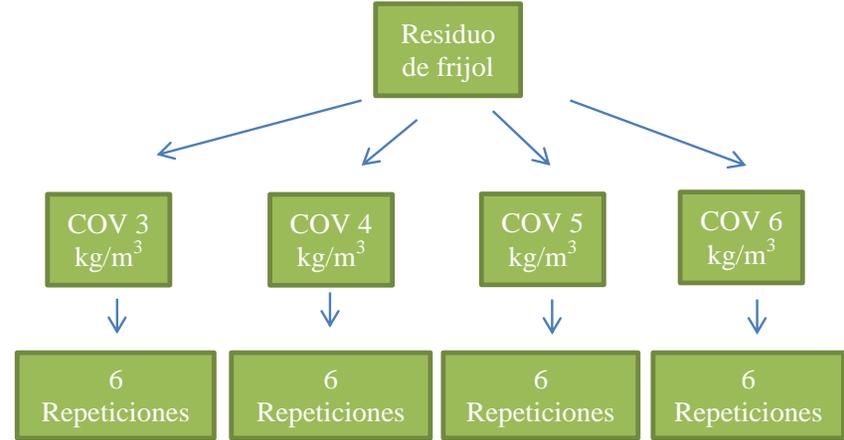
y una mezcla o codigestión de ambos residuos de cultivo pero a diferente concentración con 70% de maíz y 30% de frijol respecto a su carga orgánica.

El segundo montaje fueron dos tratamientos: 50% de maíz con 50 % de frijol y 30% de maíz con 70% de frijol. Las cuatro cargas orgánicas para cada tratamiento fueron 3 kg SV/m<sup>3</sup>, 4 kg SV/m<sup>3</sup>, 5 kg SV/m<sup>3</sup> y 6 kg SV/m<sup>3</sup>. Asimismo, junto a los demás biorreactores con su respectivo sustrato, se montaron dos blancos por cada montaje solamente con biol en las mismas condiciones pero sin agregar sustrato, esto para saber cómo las características del biol influirían a lo largo del ensayo (Cevallos e Hidalgo 2003). A continuación se presenta una representación gráfica del montaje.

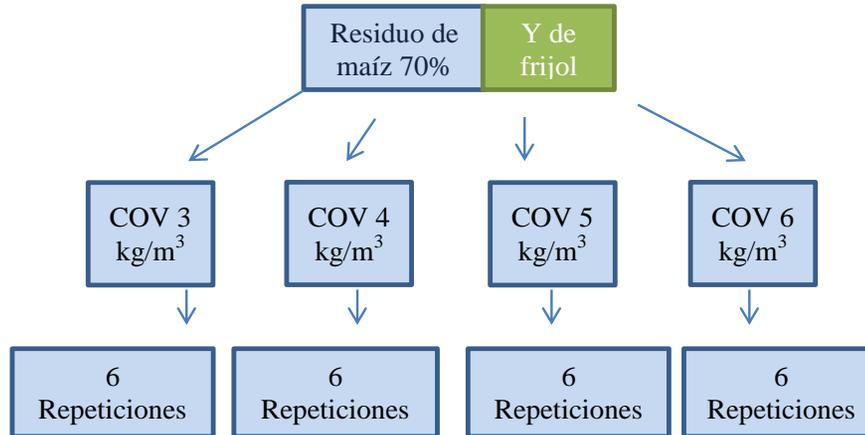
**Tratamiento 1**



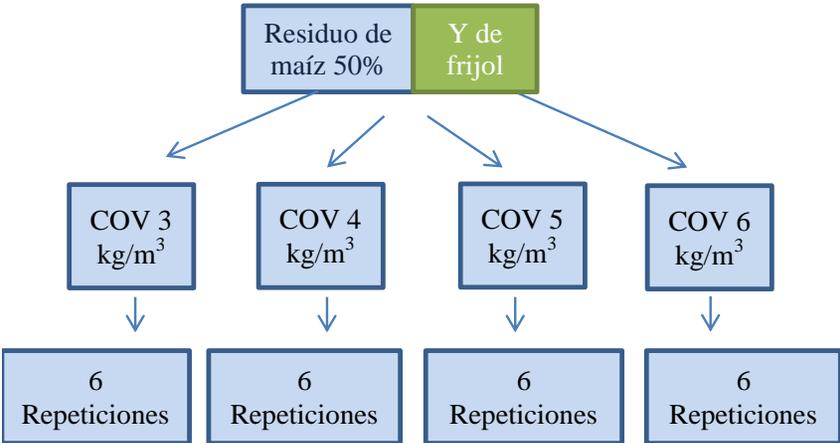
**Tratamiento 2**



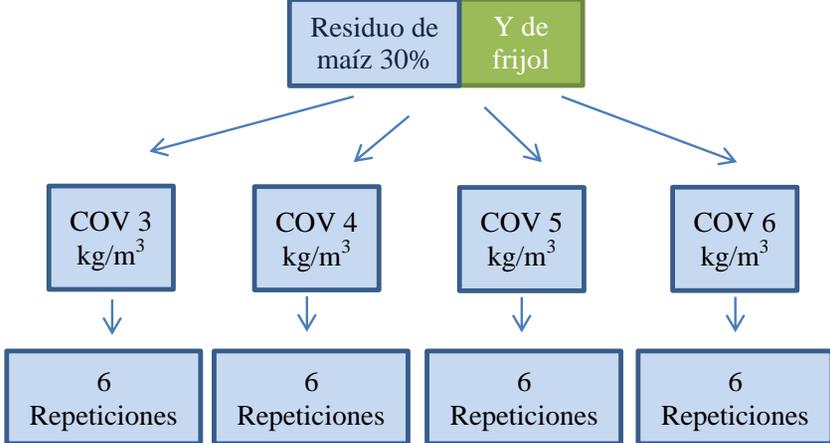
**Tratamiento 3**



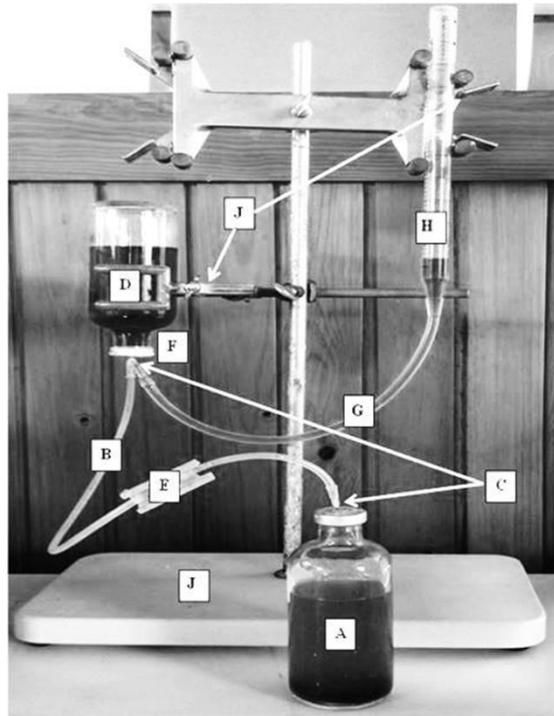
**Tratamiento 4**



**Tratamiento 5**



**Cuantificación de metano.** Para poder calcular la cantidad de metano producido por cada biorreactor se utilizó el montaje mostrado en la figura 2, en el cual se puede observar al lado izquierdo un bote que contiene una solución de hidróxido de potasio (KOH) que tiene como indicador el rojo de alizarina el cual está conectado mediante una manguera en una bureta al lado derecho.



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

Figura 2. Montaje del método para cuantificar el metano.  
Fuente: Cevallos e Hidalgo 2013.

Se conectarán uno a uno cada biorreactor mediante una manguera al bote con alizarín y KOH pasando el biogás del digestor a la botella con solución básica, todos los gases a excepción del metano ( $\text{CH}_4$ ) reaccionan con el KOH formando carbonatos.

Se registró el volumen inicial y final del hidróxido de potasio en la bureta después de ser desplazado por el metano. Este procedimiento se repite a las 120 biorreactores. Las mediciones de cada biorreactor batch se realizaron con una periodicidad de 3 días durante 55 días en el primer montaje y por 25 días en el segundo montaje con el mismo período de medición. A mismo tiempo se registraban otros parámetros como: temperatura y presión atmosférica. Al final el resultado de Índice de Producción de Metano se expresa en  $\text{m}^3/\text{kg SV}$ . (Cevallos e Hidalgo 2013).

**Metodología para corrección de metano.** La tabulación de datos se llevó a cabo tomando en cuenta los datos registrados de cada medición además de los parámetros de temperatura (°C) y presión atmosférica (mm Hg). Las variables se convirtieron a las unidades deseadas que son: temperatura en Kelvin y presión atmosférica en bar utilizando la siguiente fórmula de metano corregido (Dinuccio *et al.* 2009):

$$V = \frac{V_m P_m T}{P T_m} \quad [2]$$

Donde V: es el volumen de metano corregido producido  
 $V_m$ : es el volumen de metano que medido en cada biorreactor  
 $P_m$ : es la presión atmosférica que existía en el momento de la medición en bar  
T: es la temperatura absoluta en grados Kelvin  
P: es la presión atmosférica absoluta en bar  
 $T_m$ : es la temperatura absoluta medida en grados Kelvin

**Cálculo del Índice de Producción de Metano (IPM).** A partir de los valores del metano acumulado normalizados, se prosiguió al cálculo del IPM, en donde radica la importancia de esta investigación. Véase la fórmula utilizada en ecuación 3.

$$IPM = \frac{V}{CO * VM} \quad [3]$$

**Donde** V: Volumen de metano (ml)  
CO: Carga Orgánica (kg SV/m<sup>3</sup>)  
VM: Volumen de mezcla (mL)

**Análisis del efluente de los reactores batch.** Al finalizar el proceso de producción de metano en los reactores batch, los frascos son abiertos y su contenido líquido se analizó para la determinación de la concentración de materia orgánica remanente, en términos de porcentaje de Sólidos Volátiles. Así mismo, se midió volumen final, pH y sólidos totales para conocer las características del mismo y poder calcular la tasa de conversión de materia orgánica en metano.

**Análisis estadístico.** Los resultados se analizaron utilizando el programa SPSS mediante el modelo estadístico ANOVA para comparación de medias Kruska Wallis, la prueba U de Mann-Whitney determinó:

- La diferencia significativa entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de los sustratos por separado (maíz y frijol).
- La diferencia significativa entre el IPM de cada sustrato y los de codigestión.
- La diferencia significativa entre el IPM de los sustratos con cambios en sus cargas orgánicas.

Al final se seleccionó el tratamiento que presentó el panorama más favorable para la producción de metano.

**Estimación del potencial energético.** Teniendo los resultados del análisis estadístico, se continuó a la selección de la mejor alternativa para producción de metano. Luego se calculó la cantidad de metano que se puede generar en base a la cantidad de residuo. Para calcular este dato se utilizó el cálculo de potencial calorífico conforme a datos de metano, el cual es  $1 \text{ m}^3$  de metano es igual a 9,500 kcal (CNE 1999). Finalmente esta conversión energética de metano en electricidad, se realizó considerando la eficiencia de conversión de un generador eléctrico operado con biogás que es de 33%.

Para conocer la cantidad de energía eléctrica que ahorraría Zamorano, en caso de instalarse un biodigestor alimentado por los residuos de maíz y frijol, se realizó una entrevista al encargado de la unidad de Maquinaria y Riego, el Ing. Francisco Álvarez, quien proporcionó la información de la energía eléctrica utilizada en el sistema de riego de El Pivote central y su gasto en dólares. Para obtener datos acerca del consumo eléctrico anual de Zamorano se obtuvo información de la Auditoría energética realizada a Zamorano por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el 2013.

El Pivote, es donde se siembra la mayor cantidad de maíz y frijol, su sistema de riego utiliza 7 motores, los cuáles se utilizan de manera alterna. Cada motor consume  $\frac{3}{4}$  de HP, es decir 0.75 HP. Estos 0.75 HP se multiplicaron por los 7 motores, dando como resultado el uso total de 5.25 HP, es decir 3.92 kW. El Pivote funciona 12 horas al día, por 90 días al año, siendo el gasto total de energía eléctrica de 4,234 kWh al año.

Para que funcione el sistema de riego, se utilizan dos galones de diésel al día. Siendo 90 días al año los que trabaja El Pivote, entonces se gastan en total 180 galones de diésel al año. Además, el galón de diésel, cuesta \$ 4.23. Debido a que el sistema de riego no requiere de energía eléctrica, se propondrá que la energía generada proyectada por la digestión anaerobia de los residuos sea conectada a la red, reduciendo de esta forma el consumo de energía convencional.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Determinación del Índice de Producción de Metano (IPM) en los reactores batch.** Se determinó el índice de producción de metano producido por cada reactor batch que fue montado con las cargas orgánicas: 3, 4, 5 y 6 kg SV/ m<sup>3</sup>. Con la medición del metano acumulado se puede conocer la cantidad de días (tiempo de retención hidráulico) necesarios para garantizar la conversión en gas de la mayor parte de la materia orgánica.

Se presenta en forma gráfica el comportamiento del proceso de producción de metano durante 55 días para diferentes cargas orgánicas, utilizando como sustrato los residuos de maíz, e incluyendo el promedio obtenido en las réplicas para la construcción de las curvas. Se observa que a mayor carga aplicada se obtiene una cantidad superior de metano, sin embargo esta productividad se equipará al obtener la relación entre el volumen de metano producido durante el proceso (m<sup>3</sup>) y la cantidad de materia orgánica aplicada a cada reactor (kg SV), lo cual da como resultado el IPM (Figura 3).

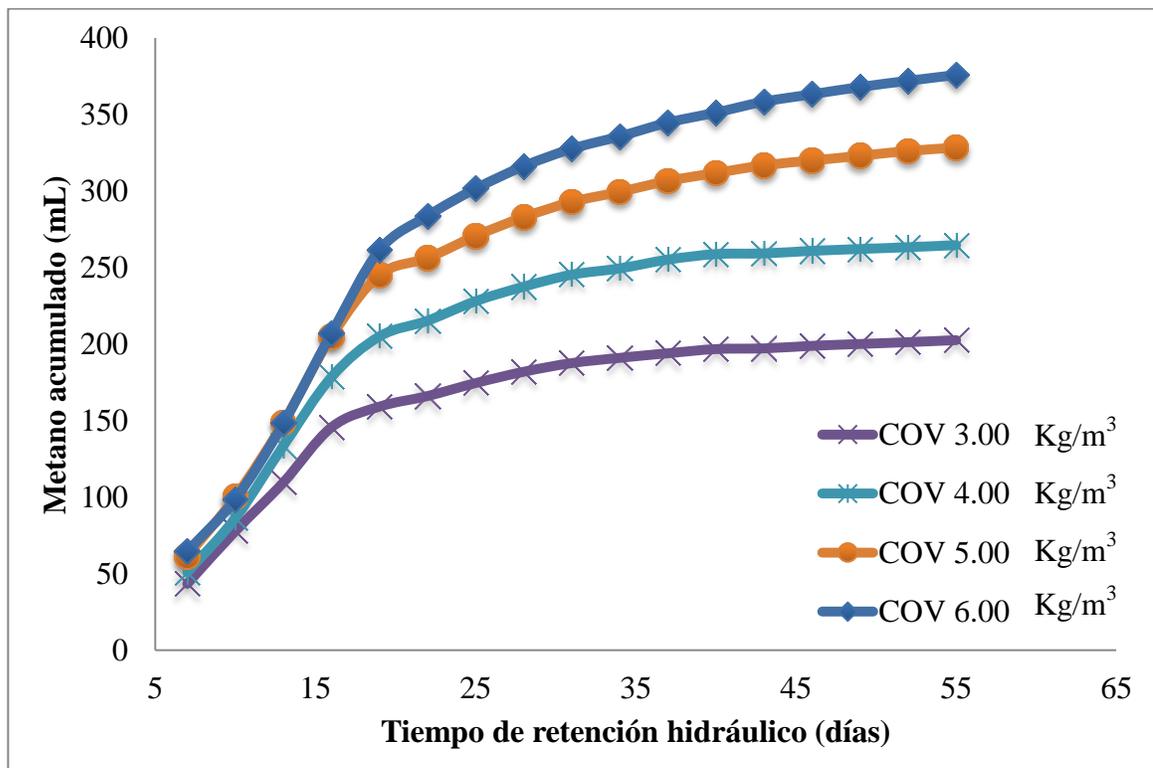


Figura 3. Índice de Producción de Metano de los reactores batch con maíz como sustrato.

A partir del primer día se observa que la actividad de las bacterias mesofílicas tuvo un aumento progresivo. Para el día 25 ya se había alcanzado el 80% de la producción total de metano. El IPM promedio para la carga orgánica de 3.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.287 m<sup>3</sup>/kg SV, para la carga orgánica de 4.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.288 m<sup>3</sup>/kg SV, para la carga orgánica de 5.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.272 m<sup>3</sup>/kg SV y para la carga orgánica de 6.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.253 m<sup>3</sup>/kg SV.

El mismo procedimiento se repite para el rastrojo de frijol y en las mezclas seleccionadas para evaluar la codigestión. Los ensayos iniciales de rastrojo de frijol, maíz y codigestión en proporción 7:3 (maíz:frijol), se llevaron a cabo en forma simultánea, durante el mismo período de tiempo. El comportamiento del ensayo con rastrojo de frijol es comparable al realizado con residuos de maíz. A partir del día siete se registra un aumento en la producción de metano. Para ambos sustratos no se observó variabilidad en el IPM calculado para las diferentes cargas. Igual que en el maíz a partir del día 25 la producción comienza a decaer, registrando volúmenes inferiores de metano hasta que la producción se detiene (Figura 4).

En comparación con el residuo maíz, se observó una productividad de metano inferior para el rastrojo de frijol. El IPM promedio para la carga orgánica de 3.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.195 m<sup>3</sup>/kg SV, para la carga orgánica de 4.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.197 m<sup>3</sup>/kg SV, para la carga orgánica de 5.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.187 m<sup>3</sup>/kg SV y para la carga orgánica de 6.0 kg SV/m<sup>3</sup> fue de 0.188 m<sup>3</sup>/kg SV.

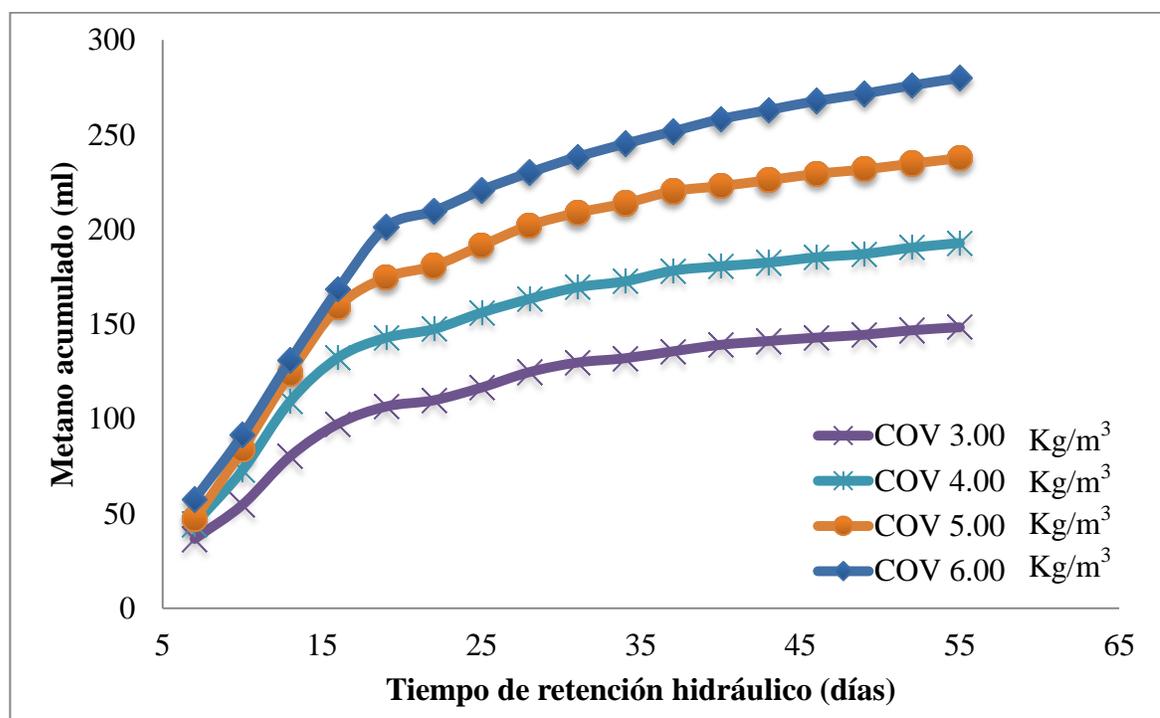


Figura 4. Índice de Producción de Metano de los reactores batch con frijol como sustrato.

Para el ensayo de codigestión de los residuos de maíz y frijol, se calculó la cantidad de gramos a utilizar para cada sustrato en base a los sólidos volátiles de la mezcla, de forma que se completara para cada una de las cargas descritas en el diseño experimental una proporción en peso de materia húmeda de 70% de maíz y 30% de frijol. Estos 24 biorreactores batch, se sometieron a las mismas condiciones de medición de los sustratos anteriores. Al igual que los residuos analizados en forma individual, se observó un aumento en la producción de metano a partir del séptimo día después de su montaje y una disminución en la producción de metano a partir del día 25. No se observó variabilidad en la productividad de metano expresada en términos de IPM para las diferentes cargas.

Se analizaron diferentes panoramas de codigestión en un segundo montaje del ensayo, con el fin de identificar la proporción de sustratos que contribuya al incremento en la productividad de metano. En este montaje se consideraron las proporciones en peso de materia húmeda de 30% de residuo de maíz y 70% de rastrojo de frijol, y de 50% de residuo de maíz con 50% de rastrojo de frijol. Este ensayo tuvo una duración de 25 días, registrando el incremento en el volumen del metano producido a partir del primer día de medición al igual que los resultados obtenidos durante el primer montaje. No se observó variabilidad de la productividad de metano expresada en términos de IPM para las diferentes cargas orgánicas aplicadas en ambos tratamientos.

**Análisis estadístico de los resultados.** Para la expresión de resultados obtenidos se utilizaron las siguientes abreviaturas, las cuales indican el tipo de sustrato o mezcla analizada.

- Residuos de maíz: S1
- Rastrojo de frijol: S2
- Codigestión 70% de residuo de maíz y 30% de rastrojo de frijol: Mezcla 1
- Codigestión 50% de residuo de maíz y 50% de rastrojo de frijol: Mezcla 2
- Codigestión 30% de residuo de maíz y 70% de rastrojo de frijol: Mezcla 3

Existe una diferencia significativa en la productividad de metano expresada en términos de IPM para los ensayos individuales realizados con residuos de maíz y de frijol. Los resultados obtenidos denotan que operando a una misma carga orgánica, un digestor alimentado con residuos de maíz tendrá una mayor productividad de metano en comparación a uno que sea alimentando con rastrojo de frijol (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación del Índice de Producción de Metano (IPM) de los sustratos por separado: maíz y frijol.

Carga orgánica (kg SV/m <sup>3</sup> )	IPM (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)		Mann Whitney U. Sig.
	S1	S2	
3	0.287	0.195	0.000*
4	0.288	0.197	0.014*
5	0.272	0.187	0.006*
6	0.253	0.188	0.050*
Promedio	0.277	0.192	
(ANOVA)Sig.	0.055	0.400	

\*Significativamente diferentes P<0.05

Comparando las tres diferentes mezclas realizadas de los residuos de maíz y frijol se comprueba que sí existe una diferencia significativa entre sus IPM. Asimismo los resultados demuestran que sí existe diferencia significativa entre sus cargas orgánicas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de los sustratos en codigestión.

Carga orgánica (kg SV/m <sup>3</sup> )	IPM (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)			Kruskal – Wallis
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	
3	0.276	0.244	0.254	0.039*
4	0.285	0.244	0.235	0.010*
5	0.259	0.223	0.209	0.002*
6	0.275	0.215	0.195	0.018*
Promedio	0.273	0.233	0.225	
(ANOVA)Sig.	0.022*	0.005*	0.001*	

\*Significativamente diferentes P<0.05.

Existe una diferencia significativa en la productividad de metano expresada como IPM tanto para los sustratos analizados en forma individual como en codigestión. Se registra que para una misma carga orgánica aplicada los valores de IPM superiores corresponden al residuo de maíz. Sin embargo al no existir una diferencia significativa para la productividad de metano a diferentes cargas en el mismo sustrato, se puede concluir que el digestor operará correctamente dentro del rango de 3 a 6 kg SV/m<sup>3</sup>, con su mayor IPM a una carga de 4 kg SV/m<sup>3</sup> de acuerdo a los resultados obtenidos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de cada sustrato y de codigestión.

Carga orgánica (kg SV/m <sup>3</sup> )	IPM (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV)					Kruskal-Wallis
	S1	S2	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	
3	0.287	0.195	0.276	0.244	0.254	0.001*
4	0.288	0.197	0.285	0.244	0.235	0.001*
5	0.272	0.187	0.259	0.223	0.209	0.000*
6	0.253	0.188	0.275	0.215	0.195	0.009*
Promedio	0.277	0.192	0.273	0.233	0.225	
(ANOVA)Sig.	0.055	0.400	0.022*	0.005*	0.001*	

\*Significativamente diferentes P<0.05.

Los resultados en conjunto denotan que el responsable de la mayor productividad de metano tanto en forma individual como en las mezclas es el maíz, registrándose los IPM más elevados para la mezcla con mayor proporción de maíz y el sustrato analizado en forma individual (Figura 5).

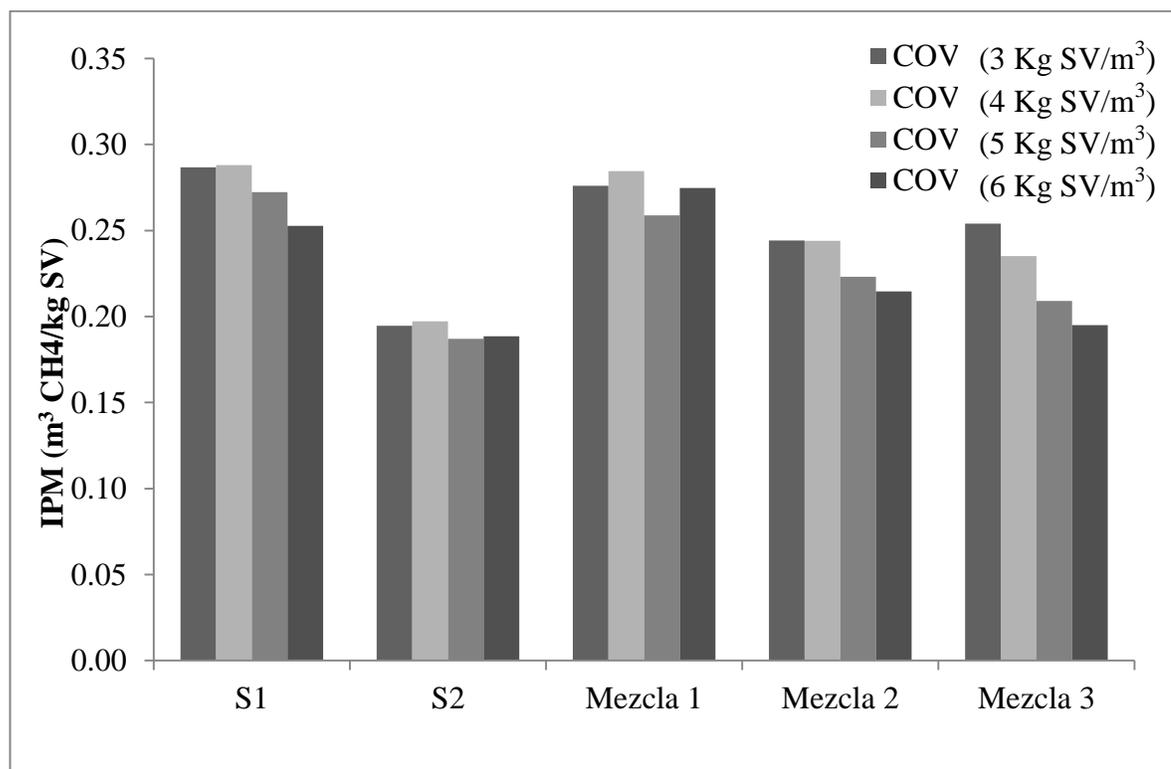


Figura 5. Comparación entre el Índice de Producción de Metano (IPM) de las diferentes fases con su respectiva carga orgánica.

**Remoción de sólidos volátiles.** Existe un porcentaje de la materia orgánica sometida a la digestión anaerobia que no se convierte en metano. Esto puede ser debido al agotamiento de micronutrientes, o que los periodos extensos de retención ocasionen desbalances en el reactor y/o la materia que queda es pobre en carbono. En este caso el porcentaje de remoción de sólidos volátiles, es decir la verdadera cantidad del sustrato (ya sea maíz o frijol) que se transformó en metano, fue de un rango de 60-70% (Cuadro 4).

Cuadro 4. Volumen de metano producido por kg de SV removidos.

Sustrato	Carga orgánica (kg SV/m <sup>3</sup> )	Remoción de sólidos volátiles (%)	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> producido/kg SV removidos
Maíz	3	61.84	0.309
	4	70.20	0.288
	5	65.43	0.321
	6	68.30	0.304
Frijol	3	68.37	0.204
	4	64.96	0.226
	5	70.67	0.233
	6	65.02	0.226

**Cuantificación de residuos.** A partir de los datos obtenidos, se pudo calcular el volumen de residuos de maíz y frijol que se produce en Zamorano. El volumen de metano que se podría producir a partir de los 1,650,000 kg de residuos de maíz generados de las 110 ha cultivadas en promedio anualmente es de 416,569 m<sup>3</sup>. Para el caso del frijol, las 32 ha cultivadas en promedio generan 52,224 kg de residuo, lo cual puede producir 8,512 m<sup>3</sup> de metano. Si se llegaran a utilizar todos estos residuos en un biodigestor, debido a la cantidad existente en Zamorano, solamente alcanzaría para una mezcla donde hay un aporte del 3% del frijol.

**Potencial energético.** Se seleccionó el IPM para el maíz con carga orgánica de 4, ya que fue el valor más alto obtenido. Este IPM fue de 0.288 m<sup>3</sup>/kg SV. Asimismo utilizando la cantidad de CH<sub>4</sub> que se puede obtener con nuestros residuos de maíz y con ayuda del potencial calorífico del metano, que es 1 m<sup>3</sup> de metano, es igual a 9,500 kCal (CNE 1999), se calculó el potencial energético de la cantidad de metano obtenida, lo cual fue de 1,518 MWh.

Utilizando la información aportada por el responsable de las actividades, se calculó la cantidad de energía eléctrica utilizada para esta actividad en el Pivote anualmente, la cual es de 4,234 kWh. Sin embargo, el sistema de riego es operado por combustibles fósiles (diésel), por lo que para aprovechar la energía generada a partir de los residuos deberá implementarse un cambio en la tecnología existente.

Sin embargo, según (BID 2013) en el 2012 Zamorano tuvo un consumo anual de 4,693 MWh, para ese año el pico de consumo energético era de 1.2 MW. Actualmente se

estiman picos de demanda de 1.4-1.6 MW por tanto, conforme a datos proporcionados por la Dirección de Planta Física se estimó que el consumo anual de Zamorano para el 2014 es de 5,866 MWh. Si la cantidad de energía producida (1,518 MWh) por los residuos es conectada a la red de abastecimiento, el aporte al consumo energético de Zamorano es de un 26% del total. Considerando que el costo para Zamorano de 1 kWh es de \$ 0.18, la contribución económica por la generación de energía sería de \$273,240 al año con la instalación de un biodigestor alimentado con los residuos de maíz.

## 4. CONCLUSIONES

- La cantidad de residuos de maíz producidos en Zamorano es de 15,000 kg/ha representando esto un 65% de la producción total y la cantidad de residuos de frijol es de aproximadamente 1,600 kg/ha simbolizando un 41% del total producido. Esto sería un punto de partida para la instalación de un biodigestor cerca de las áreas de producción utilizando dichos residuos.
- Las cantidades de residuos de frijol disponibles no permiten aplicar la metodología de la codigestión en las proporciones del estudio, sin embargo pueden ser incorporados al digestor en porcentajes inferiores al 10% de la mezcla.
- El sustrato que obtuvo una mayor productividad de metano fue el maíz, siendo la carga orgánica óptima de 4 kg SV/m<sup>3</sup> la que obtuvo el más alto IPM de 0.288 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV. El volumen de metano que se podría producir a partir de los residuos de maíz generados es de 416,569 m<sup>3</sup>. Al no tener diferencias significativas del IPM entre las cargas orgánicas analizadas, el digestor operará sin problemas de sobrecarga dentro del rango de 3 a 6 kg SV/m<sup>3</sup>.
- El maíz impacta de forma positiva en la productividad de metano de las mezclas con residuo de frijol, obteniéndose un incremento en el IPM en las mezclas que presentan una mayor proporción de residuos de maíz. Debido a que existe una mayor generación de residuos de maíz en Zamorano, ambos residuos pueden ser usados para alimentar un biodigestor, tomando la precaución de que el residuo de maíz, se encuentre siempre en mayor proporción.
- La conversión de sólidos volátiles en metano fue entre el 60 y 70%, por lo que el bioabono resultante del proceso de digestión, mantendrá una concentración de materia orgánica que podrá ser reincorporada al suelo, manteniendo las condiciones favorables para la continuidad de los cultivos.

## 5. RECOMENDACIONES

- Identificar sustratos adicionales que puedan potenciar la productividad de metano en codigestión con el maíz y el frijol, como por ejemplo residuos de alimentos o estiércol.
- Desarrollar un estudio de factibilidad simulando un proceso en continuo con los residuos disponibles, que permita cuantificar la productividad diaria de metano bajo las condiciones de operación futuras.
- Realizar un inventario de residuos orgánicos en el campus que puedan ser considerados en un sistema integral de digestión anaerobia como fuente alternativa de energía renovable para Zamorano.
- Realizar un estudio de las condiciones que pueden afectar la conversión de la materia orgánica medida en términos de sólidos volátiles, en metano. Esto puede referirse a estudios de disponibilidad de micronutrientes o factores que contribuyan a la estabilidad de las condiciones apropiadas para el mantenimiento de la población de microorganismos metanogénicos.
- Realizar un estudio que evalúe la diferencia en la calidad del suelo cuando los residuos de maíz y frijol son incorporados nuevamente en el campo, en comparación a cuando son fertilizados con el efluente resultante de la digestión anaerobia llamado biol, el cual aún contiene de 30-40% de materia orgánica en su composición.

## 6. LITERATURA CITADA

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

Ayala, O., Pichardo, J., Estrada, J., Carrillo, J. y Hernández, A. 2006. Rendimiento y calidad de semilla del frijol ayocote en el valle de México. Agricultura Técnica en México Vol. 32 Núm. 3. 313 p.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID) 2013. Auditoría Energética de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano (EAP), Honduras. Zamorano, Honduras. 93 p.

Cevallos, W.K., Hidalgo K. L. 2013. Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano. Tesis Ing. Amb. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 39 p.

Chinchilla, J. 2013. Evaluación de la producción de metano en el tratamiento de los residuos del café mediante la digestión anaerobia en dos fases. Tesis Ing. Amb. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 27 p.

Comisión Nacional de Energía (CNE). 1999. El gas natural (en línea). Consultado 15 de Octubre de 2014. Disponible en [Http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/informe\\_sectores/1999/gas/chap2.pdf](Http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/informe_sectores/1999/gas/chap2.pdf)

Deublein, D., Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources (en línea). Consultado 29 de octubre de 2014. Disponible en <http://books.google.hn/books?hl=es&lr=&id=CJiMmmxu2tcC&oi=fnd&pg=PT13&dq=Biogas+from+Waste+and+Renewable+Resources&ots=IkixjJ9WRe&sig=78YWzUYN28LTro5800IUfNY4izI#v=onepage&q=Biogas%20from%20Waste%20and%20Renewable%20Resources&f=false>

Dinuccio, E., Balsari P., Gioelli, F. y Menardo, S. 2009. Bioresource Technology. 101(2010). Turin, Italia, Elsevier. 3,783 p.

Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A. y Pirozzi, F. 2012. Bio-methane potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates (en línea). Consultado 29 de octubre de 2014. Disponible en <http://ben.thamopen.com/toenviej/articles/V005/1TOENVIEJ.pdf>

García, A., Kohashi, J., Baca, G.A. y Escalante, J.A.S. 2003. Rendimiento y asignación de materia seca de una variedad de frijol en un sistema hidróponico y suelo (en línea). Consultado 29 de octubre de 2014. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/573/57321403.pdf>

INEA 2001. Toma de muestras (en línea). Consultado 29 de mayo de 2014. Disponible en <http://legado.inea.org/web/laboratorio/muestras.asp>

López, A., De Arco, F., 2013. Evaluación del potencial energético de las aguas rojas originadas en la sala de cosecha de la Planta de Cárnicos de Zamorano. Tesis Ing. Amb. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 33 p.

Moody, L., Burns, R., Wu-Haan, W. y Spajiš, R. 2009. Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance. Consultado 29 de octubre de 2014. Disponible en [http://sa.agr.hr/pdf/2009/sa2009\\_p1009.pdf](http://sa.agr.hr/pdf/2009/sa2009_p1009.pdf)

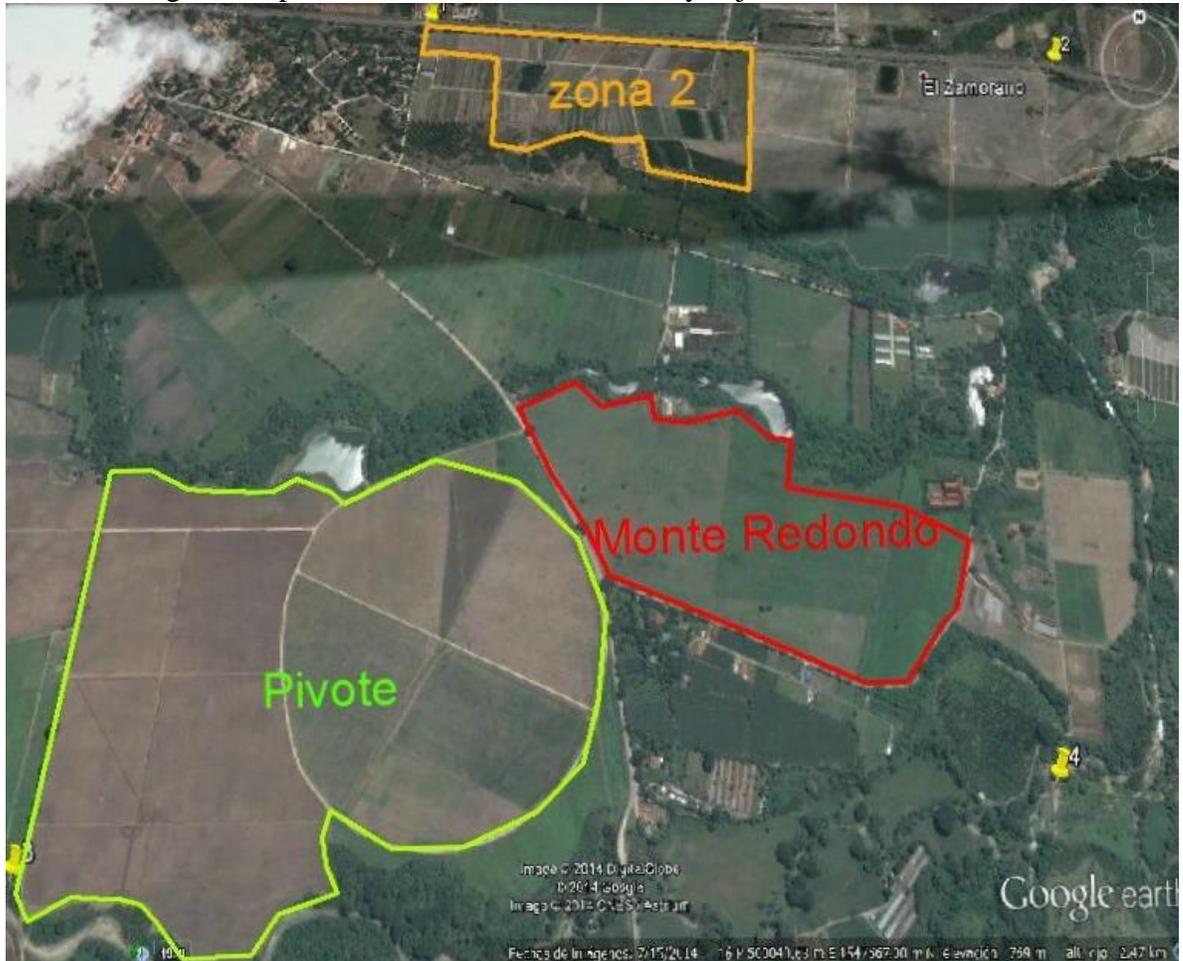
Nizami, A.S., Orozco, A., Groom, E., Dieterich, B. y Murphy, J.D. 2011. Applied Energy. 92 (2012). Irlanda, Elsevier. 790 p.

Roati, C., Fiore, S., Ruffino, B., Marchese, F., Novarino, D. y Zanetti, M. C. 2012. American Journal of Environmental Sciences. 8 (3). Torino, Italia, Science Publications. 6 p.

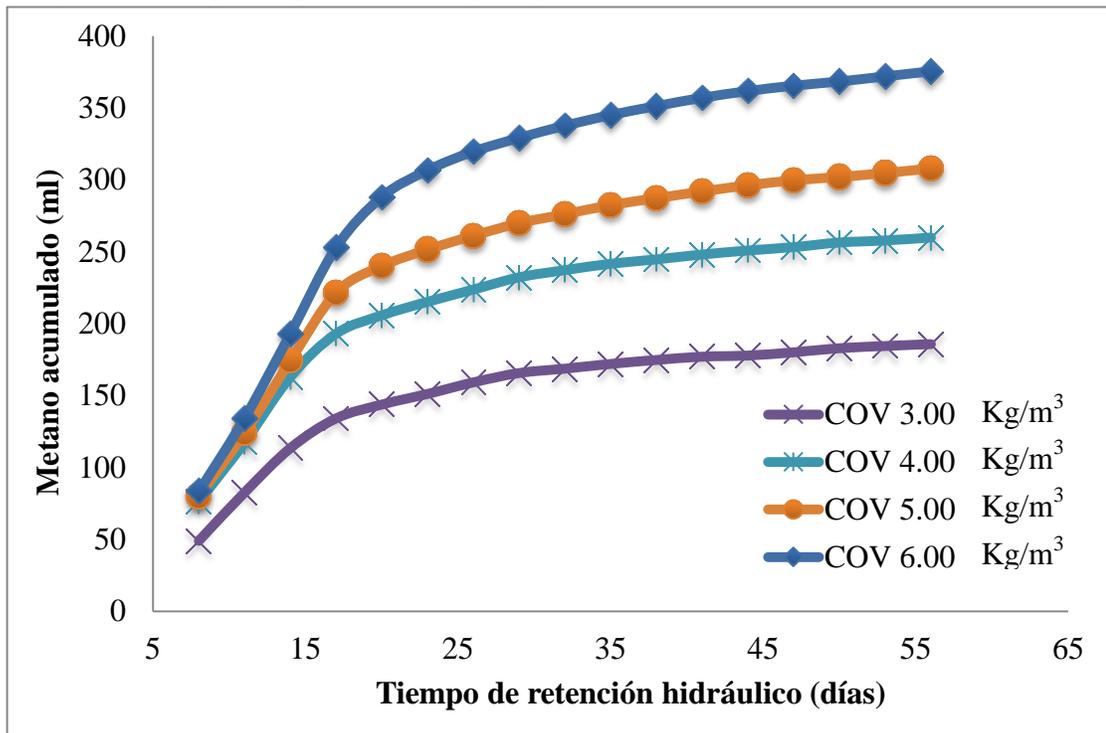
Varnero, M. 2011. 2. Manual de Biogás. Santiago de Chile, Chile. 119 p.

## 7. ANEXOS

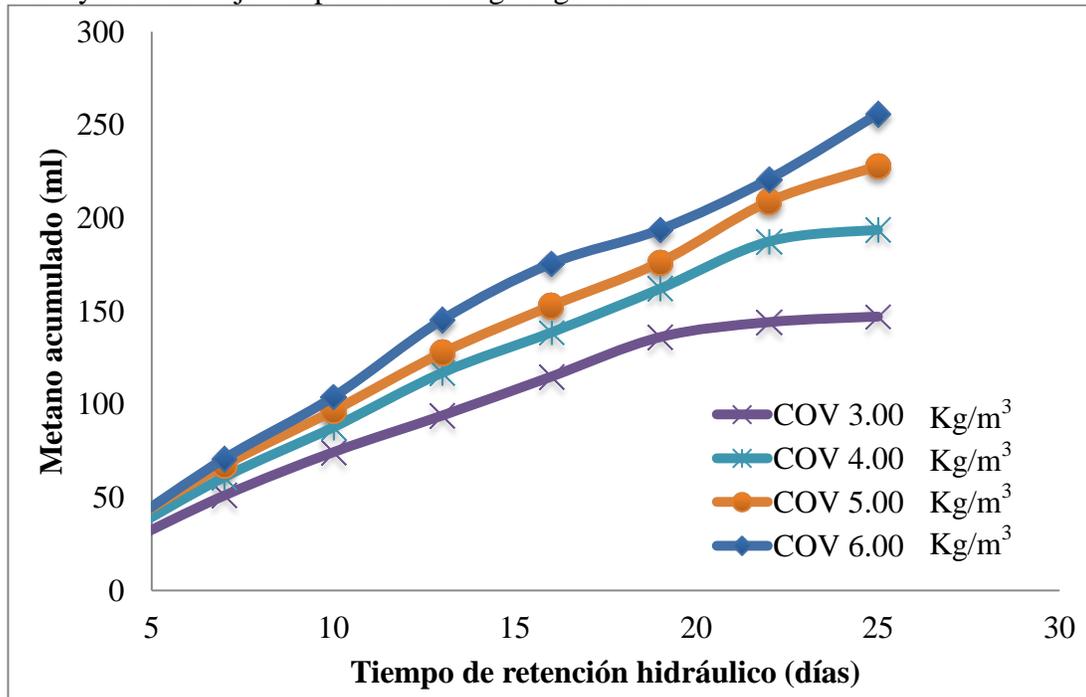
Anexo 1. Lugares de producción de cultivos de maíz y frijol.



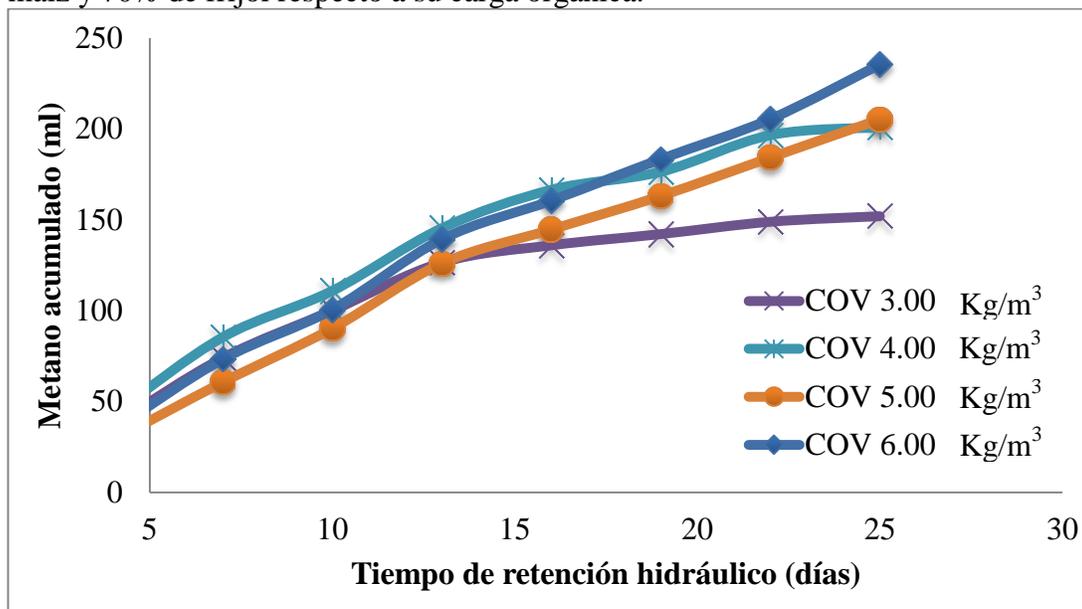
Anexo 2. Índice de producción de metano de los reactores batch con mezcla de 70% de maíz y 30% de frijol respecto a su carga orgánica.



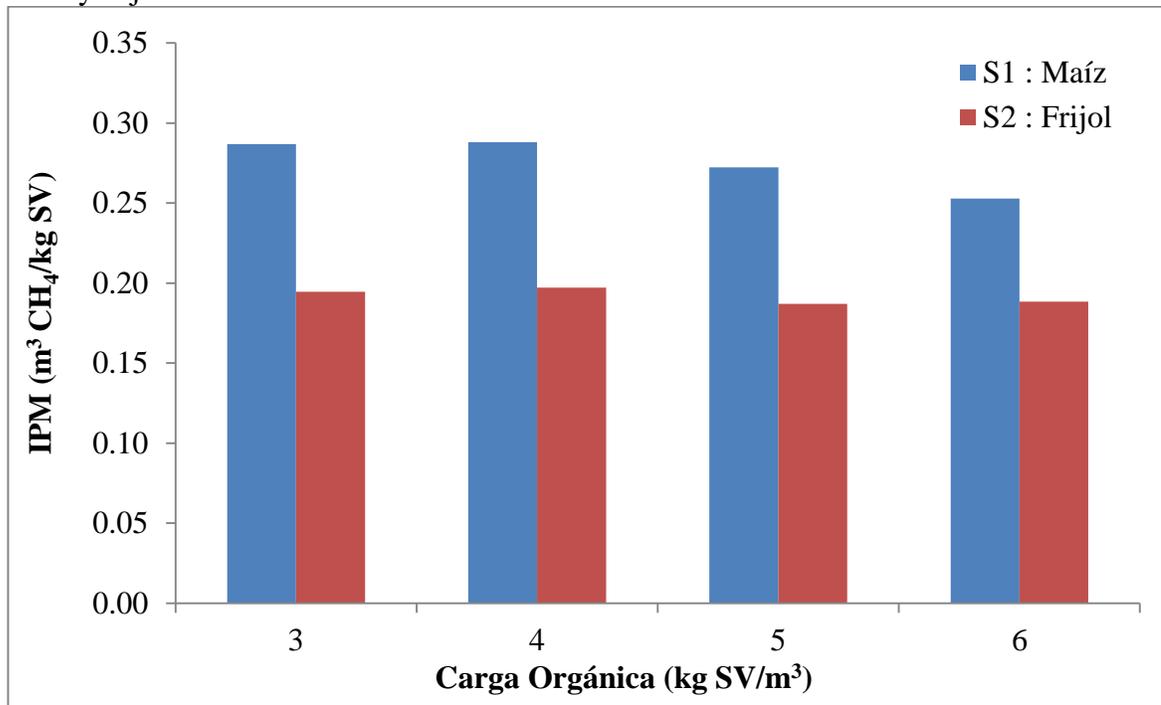
Anexo 3. Índice de producción de metano de los reactores batch con mezcla de 50% de maíz y 50% de frijol respecto a su carga orgánica.



Anexo 4. Índice de producción de metano de los reactores batch con mezcla de 30% de maíz y 70% de frijol respecto a su carga orgánica.



Anexo 5. Comparación del Índice de Producción de Metano (IPM) entre los sustratos de maíz y frijol.



Anexo 6. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de maíz.

Carga orgánica (kgSV/m <sup>3</sup> )	70%		80%		90%	
	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)
3	16	142	20	162	28	182
4	17	185	21	212	28	238
5	18	230	23	263	32	296
6	19	263	25	301	35	338

Anexo 7. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de frijol.

Carga orgánica (kgSV/m <sup>3</sup> )	70%		80%		90%	
	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)
3	18	104	26	119	35	134
4	17	135	24	154	35	174
5	17	166	25	190	34	214
6	19	196	26	224	37	252

Anexo 8. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de mezcla de maíz al 70% y frijol al 30%.

Carga orgánica (kgSV/m <sup>3</sup> )	70%		80%		90%	
	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)
3	16	130	22	149	31	167
4	16	182	21	208	30	234
5	17	216	22	246	33	277
6	18	263	22	300	32	338

Anexo 9. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de mezcla de maíz al 50% y frijol al 50%.

Carga orgánica (kg SV/m <sup>3</sup> )	70%		80%		90%	
	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)
3	14	103	16	118	18	132
4	16	136	18	155	20	174
5	17	159	20	182	22	205
6	17	179	20	205	23	230

Anexo 10. Escenarios de la producción de metano y tiempo de retención hidráulico para reactores batch con sustrato de mezcla de maíz al 30% y frijol al 70%.

Carga orgánica (kg SV/m <sup>3</sup> )	70%		80%		90%	
	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)	TRH (día)	CH <sub>4</sub> (ml)
3	11	106	12	122	16	137
4	13	141	15	161	20	181
5	16	144	19	164	22	185
6	17	165	20	188	23	212

Anexo 11. Datos iniciales y finales de cada residuo y las mezclas.

Sustratos	COV (kg SV/ m <sup>3</sup> )	Inicial				Final		% Remoción ST	% Remoción SV
		% ST	%SV(ST)	ST (g/L)	SV (g/L)	ST (g/L)	SV (g/L)		
		Sustrato		Biol		Sustrato + Biol			
Maíz	3	93.516	93.7635	3.697	1.245	4.32	1.67	39.243	61.841
	4	93.516	93.7635			3.64	1.66	56.957	70.197
	5	93.516	93.7635			4.14	2.17	54.38	65.426
	6	93.516	93.7635			4.82	2.38	53.93	68.3
Frijol	3	92.3669	89.5715			3.45	1.44	54.345	68.367
	4	92.3669	89.5715			4.01	1.77	48.993	64.96
	5	92.3669	89.5715			4.26	1.98	57.534	70.673
	6	92.3669	89.5715			5.16	2.56	50.86	65.019
Mezcla M70 + F30	3	93.516	93.7635			4.372	1.61	39.363	63.525
		92.3669	89.5715						
	4	93.516	93.7635			4.216	1.84	50.554	67
		92.3669	89.5715						
	5	93.516	93.7635			5.17	2.35	46.313	64.42
		92.3669	89.5715						
Mezcla M50 + F50	6	93.516	93.7635			5	2.49	51.066	65.758
		92.3669	89.5715						
	3	93.516	93.7635	2.716	1.106	3.27	1.58	46.033	61.91
		92.3669	89.5715						
	4	93.516	93.7635			4.02	1.9	42.682	62.434
		92.3669	89.5715						
Mezcla M30 + F70	5	93.516	93.7635			4.29	2.18	51.849	67.23
		92.3669	89.5715						
	6	93.516	93.7635			4.58	2.63	50.577	62.995
		92.3669	89.5715						
	3	93.516	93.7635			3.66	1.79	39.537	56.726
		92.3669	89.5715						
Mezcla M30 + F70	4	93.516	93.7635			3.63	1.78	48.244	64.593
		92.3669	89.5715						
	5	93.516	93.7635			3.85	2.08	52.526	65.463
		92.3669	89.5715						
	6	93.516	93.7635			3.93	2.07	59.622	72.102
		92.3669	89.5715						

Anexo 12. Recolección de muestras.



Tomada por: Mishelle Aroca.

Anexo 13. Montaje de los biorreactores batch.



Tomada por: Cindy Ventura.