

Capítulo 7 Estudio del potencial de generación de metano empleando diferentes materias orgánicas de desecho

Chapter 7 Study of the potential for methane generation employing different organic waste materials

HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Víctor†, OLVERA-GARCÍA, Omar, GONZALEZ-AGUIRRE, Jesus y GONZALEZ-MAYA, Luis

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Estado de México, México

ID 1^{er} Autor: *Víctor, Hernández-Gómez* / **ORC ID:** 0000-0001-9315-5869, **Researcher ID Thomson:** S-6575-2018, **CVU CONACYT-ID:** 122247

ID 1^{er} Coautor: *Omar, Olvera-García* / **ORC ID:** 0000-0001-6386-9772, **Researcher ID Thomson:** S-6644-2018, **CVU CONACYT-ID:** 706478

ID 2^{do} Coautor: *Jesus, Gonzalez-Aguirre* / **ORC ID:** 0000-0003-3325-6005, **Researcher ID Thomson:** S-6756-2018, **CVU CONACYT-ID:** 947506

ID 3^{er} Coautor: *Luis, Gonzalez-Maya* / **ORC ID:** 0000-0002-0005-2017, **Researcher ID Thomson:** S-6755-2018, **CVU CONACYT-ID:** 947203

V. Hernandez, O. Olvera, J. Gonzalez y L. Gonzalez

vichugo@unam.mx

A. Marroquín, H. Corres y L. Carpio. (Dir.) Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Queretaro, 2018.

Abstract

This paper contributes to the study of biogas production using different types of organic matter have in the Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. They were manufactured and orchestrated 12 biodigesters the Batch type with capacity of 33 lt each, for a comparison of biogas generation with different types of organic matter at different dilutions and know which features the production of higher biogas, with the highest concentration methane. Two tests were conducted, the first to select the type of organic matter and the second to quantify the production of biogas. The second test lasted 96 days using 12 biodigesters simultaneously with 5 different types of organic matter. pressure, temperature, and pH tests were taken with a gas analyzer to determine the concentration of methane. It was found that the cow dung produces the most biogas, but rabbit droppings produced the highest percentage of methane (above 70%). Some organic materials like pruning grass and food waste were influenced by a very acidic pH that completely inhibited the process of anaerobic fermentation, and some other temperature decreased drastically causing biogas production decrease.

Biogás, Metano, Biodigestor, Composta, Excremento

1 Introducción

La producción de desechos domésticos es una variable que depende básicamente del tamaño de la población y de sus características socioeconómicas y varía de una población a otra, de acuerdo principalmente a su grado de urbanización, su densidad poblacional y su nivel de consumo o nivel socioeconómico. Según el análisis sectorial de desechos sólidos en la Zona Metropolitana del Valle de México [1], aproximadamente el 53% de los desechos generados pueden emplearse para la producción de biogás en México y la SEDESOL reporta 25,000 ton/día que se depositan en tiraderos a cielo abierto, barrancas o bien, en cualquier otro sitio sin control (incluye sitios clandestinos). Los desechos que generan mayor cantidad de metano son los de alcantarilla seguido de los desechos de animales y por último el de poda de pasto y residuos de alimentos. La selección del tipo de desecho depende de la disponibilidad del mismo, por ejemplo, de los residuos domésticos, de la granja o cultivo.

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía 2016 [2], en México el 8.4% de la generación de energía es por fuentes renovables, de los cuales el 4.7% es generada por biomasa y biogás. Se estima que para el año 2030 se puede tener un potencial de generación de energía de hasta 277 mil MW de los cuales se espera que el 43.13% corresponda a la utilización de biogás. En la tabla 7.1 se presenta la capacidad y potencial generación de energía a través de fuentes renovables en México. En 2012 el país contaba con 253 centrales en operación y construcción para la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables; Oaxaca y Veracruz son los estados con mayor número de proyectos eólicos y de biomasa, respectivamente. Se han aprobado permisos para la generación de 5,011.70 MW de energía eléctrica a través de fuentes renovables, de los cuales el 15% corresponde a la generación de biogás.

En el caso particular de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, dentro de las 15 carreras que se imparten, están la de Médico Veterinario Zootecnista y la de Ingeniero Agrícola. Para cubrir las actividades académicas de estos alumnos, la FESC cuenta con grandes áreas compuestas por establos, corrales, invernaderos, tierras para cultivo (maíz, alfalfa, sorgo, cebolla, vides y nopal), etc.

Tabla 7.1 Producción de energía primaria por fuentes renovables

Energía	Producción de energía (PetaJoules)
Hidráulica	110.51
Eólica	37.36
Geotérmico	132.59
Biomasa	361.70
Biogás	1.91
Solar	11.19

Fuente: Balance Nacional de energía 2016. Secretaría de energía

Los desechos orgánicos producto de los animales, así como de las actividades de cultivo, son depositados a cielo abierto, como se observa en la figura 7.1, provocando que, al descomponerse, liberen el biogás a la atmosfera. Se pueden aprovechar estos desechos orgánicos para obtener biogás (metano) que puede ser suministrado a los laboratorios o que permita calentar agua para diferentes usos por ejemplo regaderas del gimnasio y para limpieza en los comedores. En general se pueden aprovechar los desechos presentados en la tabla 7.2.

Figura 7.1 Clasificación de los desechos orgánicos encontrados en la FESC



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7.2 Clasificación de los desechos orgánicos encontrados en la FESC

Origen del desecho	Tipo de desecho
Animal	Estiércol de ganado vacuno (vaca y toro)
	Estiércol de ganado ovino y caprino (borrego, cabras y chivos)
	Estiércol de ganado equino (caballo, mula, burro y poni)
Agrícolas	Poda de pasto y arboles
	Residuos de cosechas
Cocina	Residuos de comedores
	Residuos de la fabricación de alimentos

Fuente: Elaboración Propia

2 Antecedentes

El primer uso de biogás fue para el calentamiento del agua de los baños públicos en Asiria, en el siglo X a.C. La primera anotación científica sobre el biogás se atribuye a Jan Baptista Van Helmont, en la primera mitad del siglo XVII (1630), quién determinó que de la descomposición de la materia orgánica se obtenían unos gases que eran inflamables. En la actualidad, se han realizado estudios para observar el comportamiento de la generación de biogás bajo distintas características como:

Amarely Santana y B. Pound [3] observaron que la variación en la alimentación de dos novillos (hierba/melaza o caña de azúcar picada) puede influenciar en la generación de metano. Encontraron que la dieta a base de melaza/hierba produce mayor cantidad de metano y sugieren que esto es debido a que se tiene una mayor relación carbono - nitrógeno que la dieta a base de caña de azúcar.

San Thy y et al [4] observaron la producción de biogás, mediante la descomposición de materia fecal de cerdo, con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días en biodigestores continuos de 510 litros. En el primer experimento, la cantidad de materia fecal fue de 5.1 kg/día, mezclado con 46, 20 o 12 litros de agua con tiempos de retención de 10, 20 o 30 días respectivamente. En un segundo experimento las proporciones de materia fecal y agua se mantuvieron constantes para dar un contenido de sólidos totales de 60 g/litro. Obtuvieron una producción de 1.04, 1.20 y 1.12 m³ de biogás por un m³ de efluente y que el tiempo de retención óptimo está entre 10 y 20 días.

Chae y et al [5] observaron el comportamiento de la generación de biogás al variar la temperatura del estiércol de cerdo en el proceso de degradación. Tomaron valores de 25 °C, 30 °C y 35 °C con cuatro cargas de alimentación al 5 %, 10 %, 20 % y 40 %. Observaron una reducción en la concentración de metano del 3% entre el de la temperatura de 35°C y la de 30°C y una diferencia del 17.4% entre la de 35°C y el de 25°C. Obtuvieron valores de 327, 389 y 403 ml de CH₄/g de sustrato respectivamente.

Stephanie y et al [6] al estudiar siete biodigestores de bajo costo en Costa Rica empleando como sustrato al agua residual de los animales, encontraron que se podía obtener biogás con una concentración del 66% de metano mejorando la calidad de las aguas residuales para ganado.

Atem y et al [7] llenaron 20 biodigestores discontinuos de PET con capacidad de 4 litros con residuos de tomate de la industria local y fluido ruminal como inóculo. Después de mantener la temperatura constante durante 118 días inició la medición del biogás generado durante otros 34 días obteniendo 0.10 m^3 de biogás por kg con un 50% de metano.

Ivet Ferrer y et al [8] estudiaron la producción de biogás en digestores domésticos ubicados a gran altura, operando bajo condiciones psicrófilas. Utilizaron un volumen útil de estiércol de vaca entre 2.4 m^3 y 7.5 m^3 en pruebas de 60 y 90 días. Obtuvieron temperaturas entre 20°C y 25°C y una producción de 0.35 m^3 por kg, con una concentración del 65% de CH_4 .

Sung-Mok y et al [9] encontraron que se incrementaba la generación de biogás, a partir de la fermentación de Laminaria japónica, al emplear un cultivo mixto de *Clostridium butyricum* y *Erwinia tasmaniensis*, llegando a tener niveles de hidrógeno y metano de 327,47% y 354,99% respectivamente.

M.S. Ak y et al [10] realizaron un estudio en el cual duplicaron la producción de biogás que se genera por la degradación del lodo activado producido durante el tratamiento biológico de residuos líquidos y sólidos, empleando al ozono ($1.33 \text{ mg O}_3/\text{g}$).

González y et al [11] realizaron un estudio para determinar la capacidad de una planta de generación de energía eléctrica empleando metano generado por la degradación de residuos de cerdo y una planta fotovoltaica. Realizaron experimentos con tres biodigestores continuos alimentándolos con 150, 200 y 250 ml de sustrato al día, durante 40, 30 y 24 días respectivamente. Encontraron una producción máxima de 22.53 m^3 de biogás por un m^3 de sustrato, con un contenido de metano del 75%.

Hernández y et al [12] determinaron el potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan y se da una propuesta para la generación de energía eléctrica.

Hernández y et al [13] presentan el diseño de dos biodigestores para la FES Cuautitlán, empleando los resultados obtenidos al realizar pruebas experimentales con estiércol de vaca y conejo.

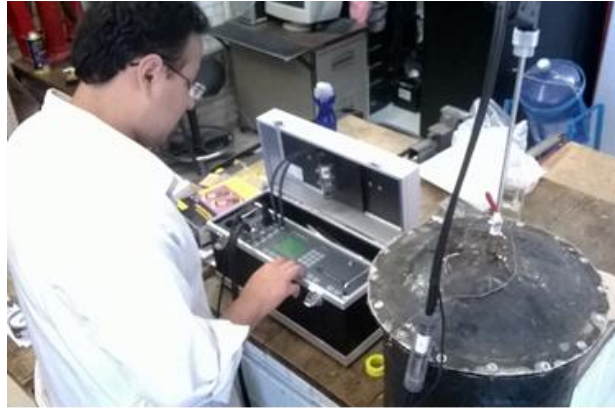
3 Estudio Experimental

El proyecto consiste en comparar los diferentes tipos de materia orgánica que se encuentran en la FESC a diferentes grados de dilución, para conocer cual presenta la mayor producción de biogás, con la concentración más alta de metano. Para realizar el proyecto se emplearon 12 biodigestores del tipo Batch con capacidad de 33 litros cada uno. Se realizaron dos pruebas, la primera fue de 84 días y la segunda de 96 días, que fue el tiempo en el que el sustrato redujo considerablemente la producción de biogás. En ambas pruebas se trabajó con cinco diferentes tipos de materia orgánica, durante ellas se tomaron lecturas de presión, temperatura, pH y porcentaje de metano. Cada biodigestor se llenó en una sola ocasión y no se contó con agitador, por lo cual el sustrato quedó estático.

Para la lectura de las variables del proceso se emplearon los siguientes equipos: para la presión se emplearon dos manómetros, uno de baja presión (menor a 2 psi) y otro hasta 14 psi; La temperatura fue recabada mediante termopares conectados a termómetros digitales, ambas lecturas se realizaban simultáneamente y en promedio cuatro lecturas diarias, de lunes a viernes, durante el tiempo que duraron las pruebas experimentales. El biodigestor cuenta con una válvula de drenado que permite la extracción de una muestra del sustrato con el cual se midió el pH mediante tiras reactivas de tornasol, una toma al inicio de cada prueba y el resto una vez por semana. Mediante el analizador de gases marca MADUR, con sensores NDIR y electrolíticos, se realizaron mediciones de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S) y oxígeno (O_2) del biogás generado dentro de los biodigestores, posteriormente se calculó los litros de metano generados. Las pruebas se realizaron cuando alcanzaban una presión mayor a 6 psi. En la figura 7.2 se muestra el proceso de medición de metano a uno de los biodigestores.

La primera prueba experimental se realizó en el periodo comprendido entre el 14 de agosto hasta el 6 de noviembre de 2013, dando un total de 84 días. Debido a que en esta prueba las muestras de poda de pastos y los desechos de comida no generaron metano suficiente, se decidió que, en la segunda prueba experimental, se cambiaran por excremento de caballo y cabra. Por otro lado, se modificaron las proporciones del sustrato con la finalidad de que se tuvieran mezclas más líquidas. Las proporciones utilizadas para cada una de las muestras, así como el número de biodigestor empleado, se presentan en la tabla 7.3.

Figura 7.2 Pruebas realizadas con el analizador de gases



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7.3 Proporciones de materia orgánica y agua (sustrato) para la primera prueba

Materia Orgánica	Proporción 1 (Materia Orgánica y Agua)	Proporción 2 (Materia Orgánica y Agua)	Proporción 3 (Materia Orgánica y Agua)
Poda de pastos	1:1 Biodigestor 2	2:1 Biodigestor 3	-
Excremento de Conejo	1:1 Biodigestor 10	2:1 Biodigestor 11	-
Excremento de Borrego	1:1 Biodigestor 12	2:1 Biodigestor 1	-
Excremento de Vaca	1:1 Biodigestor 7	2:1 Biodigestor 8	3:1 Biodigestor 9
Desechos de Comida	1:1 Biodigestor 4	2:1 Biodigestor 5	3:1 Biodigestor 6

Fuente: Elaboración Propia

La segunda prueba fue realizada entre el 21 de noviembre de 2013 hasta el 25 de febrero de 2014, contabilizando un total de 96 días. La toma de lecturas para el pH se mantuvo igual a la prueba anterior, pero las lecturas de presión y temperatura fueron de dos por día, por cinco días a la semana. Las pruebas con el analizador de gases fueron una vez a la semana para permitir tener una visualización más detallada del cambio en el porcentaje de metano conforme avanza el tiempo. Los sustratos empleados para la segunda prueba se presentan en la tabla 7.4. Debido a que el proyecto consideraba sólo la producción de metano, no se realizaron pruebas a los residuos de los biodigestores.

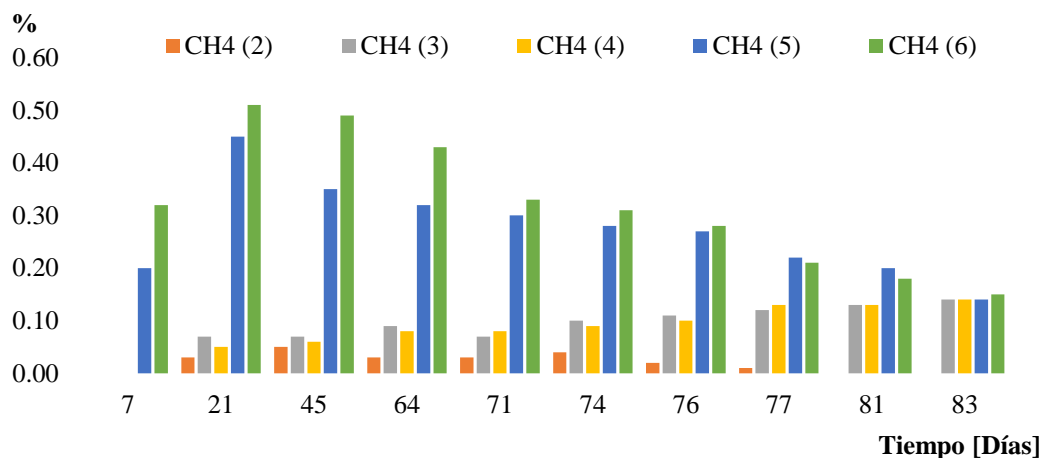
4 Resultados y discusión

En el gráfico 7.1 se muestra el porcentaje de metano del biogás generado durante los 84 días para los biodigestores 2, 3, 4, 5 y 6 de la primera prueba. El porcentaje de metano (CH₄) máximo fue el del biodigestor 6 que contenía desechos de comida a proporción de 3:1, que fue de apenas 0.5%, pero el porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) presente en los biodigestores 2 a 6, fue mayor al 50%, el resto fue de oxígeno y otros gases que no pueden ser detectados por el analizador, el ácido sulfhídrico (H₂S) para estos 5 biodigestores estuvo entre 5 y 400 ppm, denotando que en todos los biodigestores el ácido sulfhídrico es alto durante los primeros días de fermentación anaeróbica y va descendiendo conforme avanza el proceso.

Tabla 7.4 Proporciones de materia orgánica y agua para la segunda prueba

Materia Orgánica	Proporción 1 (Materia Orgánica y Agua)	Proporción 2 (Materia Orgánica y Agua)	Proporción 3 (Materia Orgánica y Agua)
Excremento de caballo	1:1 Biodigestor 1	1:2 Biodigestor 2	-
Excremento de cabra	1:1 Biodigestor 3	1:2 Biodigestor 4	-
Excremento de conejo	1:1 Biodigestor 10	1:2 Biodigestor 11	1:3 Biodigestor 12
Excremento de borrego	1:1 Biodigestor 5	1:2 Biodigestor 6	-
Excremento de vaca	1:1 Biodigestor 7	1:2 Biodigestor 8	1:3 Biodigestor 9

Fuente: Elaboración Propia

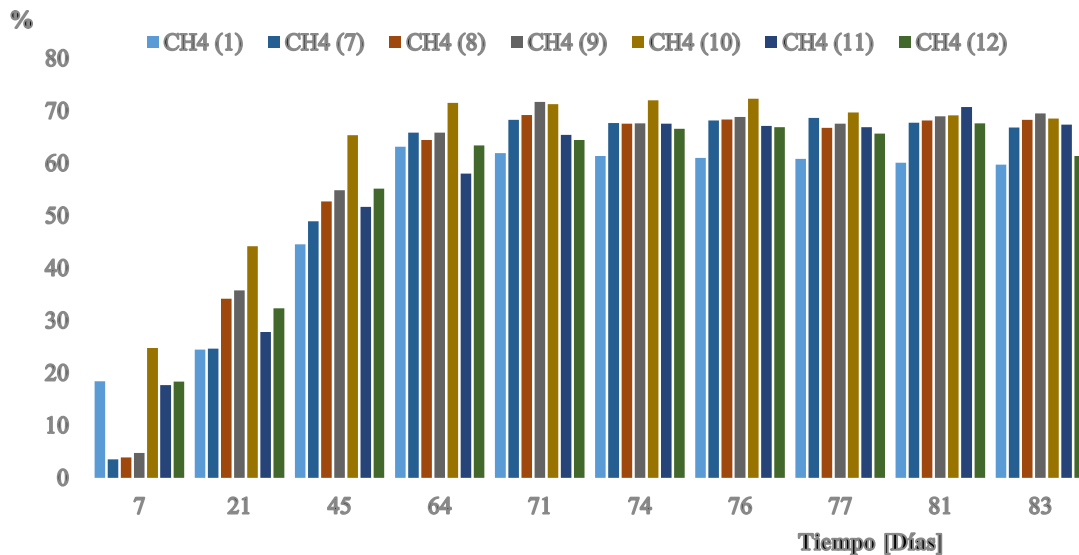
Gráfico 7.1 Porcentaje de metano para la poda de pastos y los desechos de comida

Fuente: Elaboración Propia

El gráfico 7.2 muestra la variación del porcentaje de metano para los biodigestores que durante la primera prueba emplearon excrementos (biodigestores 1, 7-12) de animales, estos muestran un porcentaje de metano excelente pasados los 60 días, teniendo valores entre el 60% y 72%, el biodigestor que alcanzó el porcentaje más alto de metano fue el número 10 con excremento de conejo a proporción de 1:1, con un 72% de metano, y a partir del día 60 su porcentaje mínimo fue de 68%, el biodigestor 11 que al igual que el biodigestor 10, contenía excremento de conejo y el biodigestor 9 que contenía excremento de vaca en proporción de 3:1, también presentaron un porcentaje de metano entre 65% y 71%, los biodigestores 7 y 8 con excremento de vaca a proporciones de 1:1 y 2:1 respectivamente presentaron un menor porcentaje de metano, denotando que para este tipo de materia orgánica, entre más excremento se agregue a la mezcla el porcentaje es ligeramente mayor comparada con uno que contenga menos excremento de vaca.

De entre todos los excrementos el que más bajo porcentaje de metano generó fueron los biodigestores 12 y 1 con excremento de borrego, de estos el que tuvo el porcentaje más alto fue el biodigestor 12 con 67% y después del día 60 no descendió del 61% y el biodigestor 1 osciló entre el 60% y 63%.

En cuanto a la segunda prueba, las temperaturas tuvieron un comportamiento muy similar a lo observado en la primera prueba, es decir, la temperatura ambiente fue superior a los demás biodigestores entre 1.5 y 2°C, aunque algunos biodigestores en algún momento tuvieron una temperatura superior a la de ambiente, se considera que pudo ser a que las pruebas de pH se realizaron al aire libre y se encontraban expuestos a la radiación solar, teniendo una temperatura ambiente máxima de 25°C y la mínima de 15.4°C, a comparación con la primera prueba que tuvo una mínima de 18°C, la temperatura se mantuvo estable en los primeros 20 días, pero decayó y se mantuvo baja hasta los 60 días, a partir de aquí y hasta el final de la segunda prueba la temperatura ascendió.

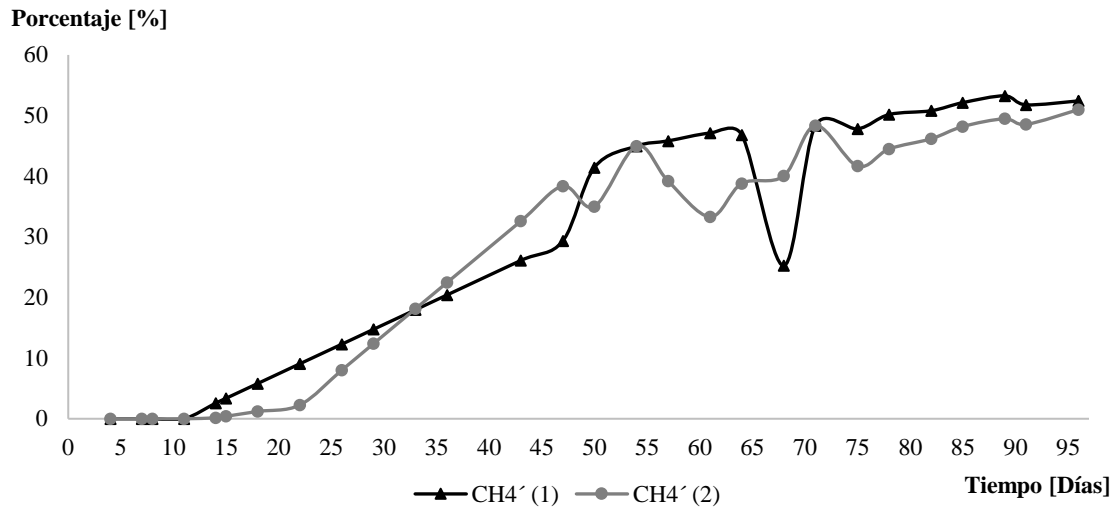
Gráfico 7.2 Porcentaje de metano producido por los excrementos de animales

Fuente: Elaboración Propia

Las temperaturas para el biodigestor 1 fueron de 26.5 y 14.9°C, en el biodigestor 2 fueron de 24.7 y 14.7°C, para el biodigestor 3 de 24.5 y 24.9°C, en el biodigestor 4 fueron de 24.2 y 14.9°C, en el biodigestor 5 de 23.6 y 13.9°C y para el biodigestor 6 fueron 24 y 13.8°C, máxima y mínima respectivamente. Las más bajas temperaturas se presentaron un poco antes de la mitad de la prueba, percibiendo que en la mayoría de biodigestores se presentara una disminución en la producción de biogás. Las temperaturas máximas para los biodigestores 7 al 12 fueron 23.6°C, 25.1°C, 23.6°C, 25.8°C, 24.5°C y 24.9°C respectivamente, las temperaturas mínimas para estos 6 biodigestores comenzado con el numero 7 hasta el 12 son de: 13.6°C, 14.9°C, 14.7°C, 15°C, 14.8°C y 14.2°C respectivamente. Se observó que los doce biodigestores tuvieron temperaturas relativamente similares, donde en base a la primera y segunda prueba se puede considerar que la relación entre materia orgánica:agua no tiene una relación directa con la temperatura, notando que la única que influye sobre la temperatura de la mezcla, es la temperatura ambiente en todo momento, dado que si la temperatura ambiente sube la temperatura interior también ascenderá y viceversa si la temperatura ambiente cae.

En cuanto al pH se observó, que al igual que en la primera prueba existe una ligera acidificación de las mezclas con forme avanza el proceso, aunque en la segunda prueba para la mayoría no fue tan significativo como en la prueba anterior. El pH máximo fue de 8.0 y lo tuvieron los biodigestores 4 y 6 con excremento de cabra y borrego, respectivamente, para ambos fue con su pH inicial; el pH mínimo fue de 5.5 atribuido a los biodigestores 2, 4 y 7, con excrementos de caballo, cabra y vaca, respectivamente, este valor lo alcanzaron a los 55 días de transcurrida la prueba, después de esto el pH ascendió ligeramente para mantenerse entre 6 y 6.5, este es el valor de pH promedio para la mayoría de los biodigestores.

En el gráfico 7.3 se muestra la variación de metano (CH₄) para los biodigestores 1 y 2 con excremento de caballo, en donde se observa que el biogás generado en ambos biodigestores fue lineal en los primeros 45 días, para el biodigestor 2, en los días 50, 61 y 75 se presentan bajas en la concentración de metano, debido a la entrada de oxígeno al biodigestor por las pruebas realizadas con el analizador.

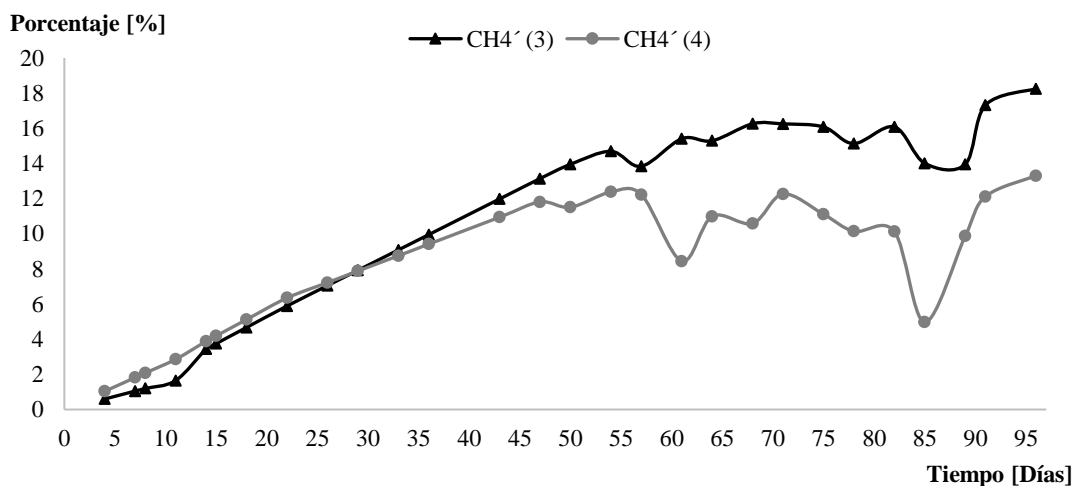
Gráfico 7.3 Porcentaje de metano para los excrementos de caballo

Fuente: Elaboración Propia

El biodigestor 1 también presenta una disminución considerable en la concentración de metano en el día 68, también causada por la presencia de oxígeno dentro del biodigestor. Los valores máximos de metano son 53.25% para el biodigestor 1 y 50.99% para el biodigestor 2, a pesar de su bajo incremento de presión, su porcentaje de metano en el biogás generado es alto, aunque aún debajo del promedio de contenido de metano presente en el biogás que es entre 60 y 70%.

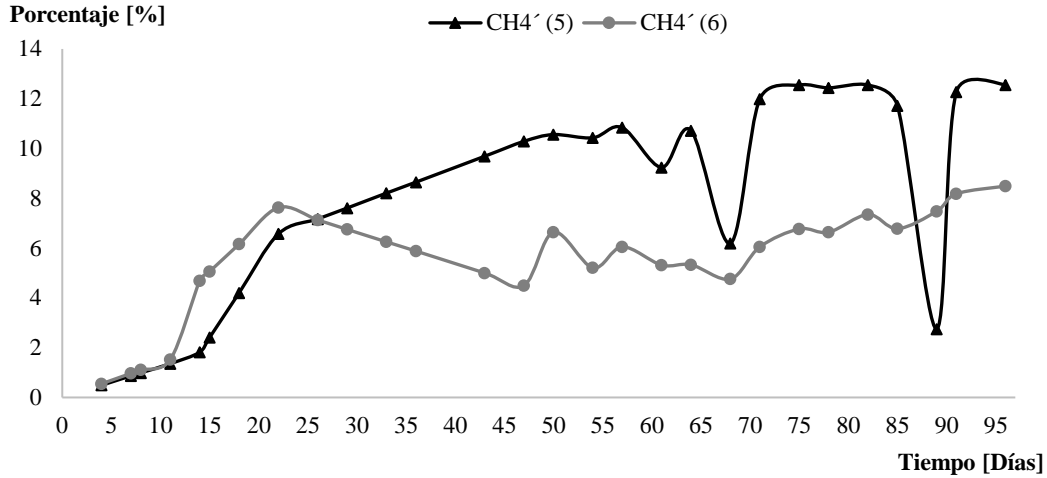
En el gráfico 7.4, se presenta el porcentaje de metano para los biodigestores con excretas de cabra, en donde se aprecia que el porcentaje de metano del biogás generado es muy bajo teniendo como máximo 18.25% para el biodigestor 3 y 13.30% en el biodigestor 4. Al igual que en los biodigestores 1 y 2 con excretas de caballo, se presentan caídas en el porcentaje de metano debido al ingreso de oxígeno en el recipiente durante las pruebas con el analizador de gases. La baja producción de metano indica una inhibición del proceso durante la etapa metanogénica, dada las bajas condiciones de temperatura. Para estas dos mezclas la proporción 1:1 presentó un mejor porcentaje de metano que la mezcla 1:2, aunque muy por debajo de lo que se esperaría.

En el gráfico 7.5 se muestra el porcentaje de metano para los excrementos de borrego, se obtuvo una muy baja concentración de metano en ambos biodigestores alcanzando apenas máximos de 12.56% y 8.49% para los biodigestores 5 y 6 respectivamente, como se aprecia también existen caídas en el porcentaje de metano en ambos biodigestores por la presencia de oxígeno dentro de estos.

Gráfico 7.4 Porcentaje de metano para los excrementos de cabra

Fuente: Elaboración Propia

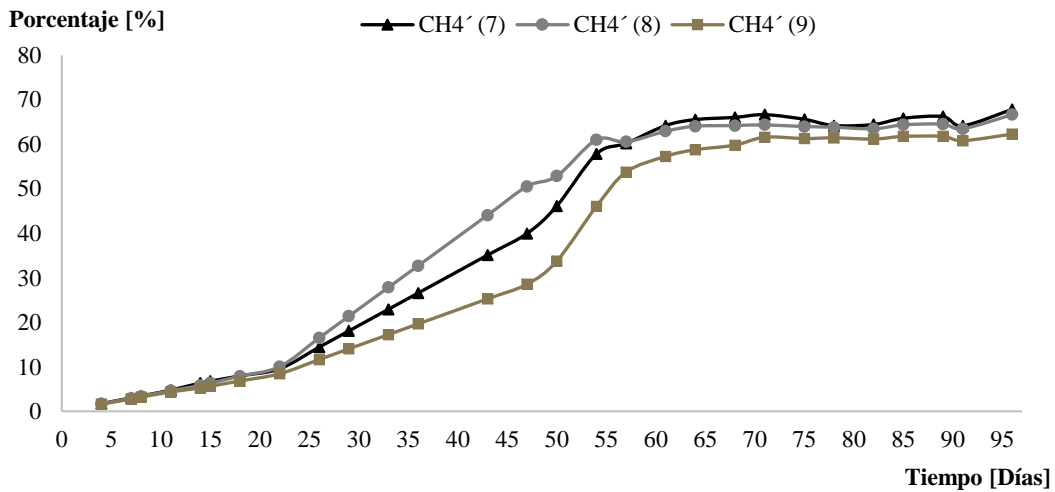
Gráfico 7.5 Porcentaje de metano para los excrementos de borrego



Fuente: Elaboración Propia

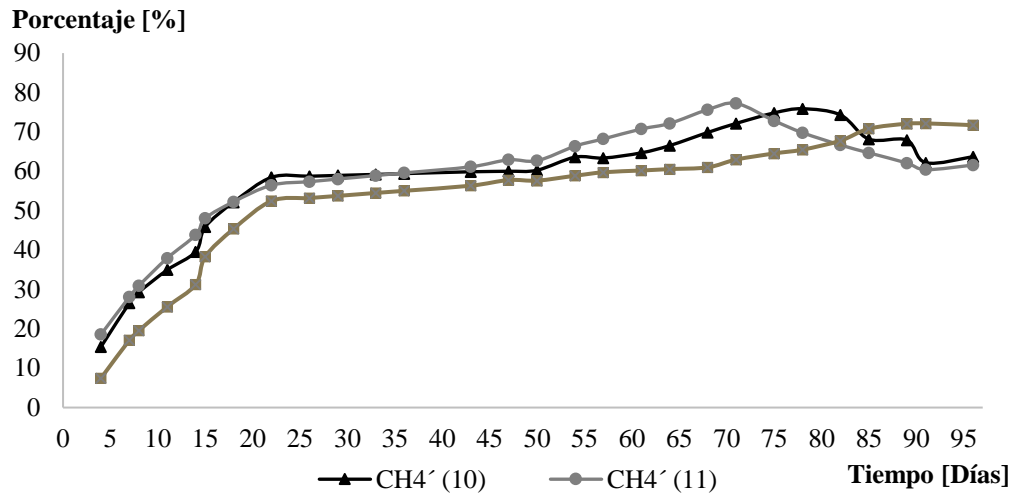
Los biodigestores 7, 8 y 9 con mezclas 1:1, 1:2 y 1:3 respectivamente, todos con excremento de ganado vacuno, presentan un excelente porcentaje de metano que se estabiliza a partir de los 60 días y hasta el final de la prueba, como se observa en el gráfico 7.6, los tres presentan un porcentaje máximo mayor al 60%, el biodigestor 7 presentó un porcentaje máximo de metano de 67.85%, en el biodigestor 8 fue de 66.66% y para el biodigestor 9 fue de 62.29%. El biodigestor 7 es el que presenta el porcentaje más alto de las tres mezclas, si comparamos el porcentaje de metano del biodigestor 7 en la primera prueba con el de la segunda prueba, ambos con excremento de vaca en proporción 1:1, observamos que el porcentaje en la segunda prueba es mayor, lo que indica que a menor temperatura se tiene un ligero aumento en el porcentaje de metano generado dentro del biogás.

Gráfico 7.6 Porcentaje de metano para los excrementos de vaca



Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 7.7, se observa la variación del porcentaje de metano para los tres biodigestores con excremento de conejo. Los tres alcanzaron más del 50% pasados los 20 días y los biodigestores 10 y 11 superaron el 60% a partir de los 40 días, el biodigestor 12 superó el 60% pasados los 60 días, los valores máximos alcanzados durante esta segunda prueba fueron de 75.87% en el biodigestor 10, 77.22% para el biodigestor 11 y 72.15% para el biodigestor 12. El biodigestor 10 alcanzó su máximo a los 70 días, y el biodigestor 11 lo alcanzo a los 78 días, para posteriormente comenzar a decaer hasta el final de la prueba. El biodigestor 11 con mezcla 1:2 tuvo el porcentaje más alto de entre todos los biodigestores, incluyendo los de la primera prueba.

Gráfico 7.7 Porcentaje de metano para los excrementos de conejo

Fuente: Elaboración Propia

Comparando el porcentaje de metano presente en el biogás generado en el biodigestor 10 de la primera (72%) y segunda prueba (75.87%), ambos con excremento de conejo a proporción 1:1, se observa que el porcentaje de metano fue mayor en la segunda prueba, probablemente esto se deba a una menor temperatura en la primera prueba. De las dos pruebas experimentales realizadas durante la elaboración de este proyecto, se puede destacar que los excrementos de conejo otorgan una excelente producción de biogás con excelente porcentaje de metano, superando el 70%.

Los excrementos de vaca también tienen una buena producción de biogás en todas las mezclas. La producción de biogás está en función de la cantidad de materia orgánica introducida en el reactor, es decir, un biodigestor que contenga mayor cantidad de materia orgánica que otro, obtendrá una mayor cantidad de biogás que otro con menor contenido de materia orgánica, a pesar de esto las mezclas con mayor dilución deben presentar una mayor productividad al obtenerse de ellas una mayor cantidad de biogás por kg de estiércol.

Las temperaturas en ambas pruebas presentan un comportamiento en función a la temperatura ambiente y no existen diferencias considerables entre mezcla y tipos de materia orgánica, denotando que a mayor temperatura el proceso es más rápido en comparación con menores temperaturas, también analizando los biodigestores 7 y 10 en ambas pruebas, se observó que a menor temperatura el porcentaje de metano tiende a ser ligeramente mayor, a pesar de esto, el tiempo de degradación se alarga y la producción de biogás es menor a bajas temperaturas. Con los resultados obtenidos en la segunda prueba de masa del sustrato, masa volátil, masa seca y volumen de biogás generado, se estimó la producción de litros de biogás por kilogramo de estiércol empleado, así como el porcentaje máximo de metano obtenido. Estos resultados se presentan en la tabla 7.5.

Tabla 7.5 Producción de litros de biogás por kilogramo de masa volátil y por kilogramo de estiércol al día de los doce biodigestores

No. De Biodigestor	Tipo de estiércol y proporción materia orgánica agua	Kg de estiércol dentro de cada biodigestor	Kg de MV dentro de cada biodigestor	Litros de biogás al día por Kg de MV	Litros de biogás al día por Kg de estiércol	Porcentaje Máximo de CH ₄ alcanzado durante los 96 días
1	Caballo a 1:1	4.000	0.688	0.327	0.056	53.250
2	Caballo 1:2	2.667	0.459	0.774	0.133	50.990
3	Cabra a 1:1	4.000	0.619	0.290	0.045	18.250
4	Cabra a 1:2	2.667	0.413	0.724	0.112	13.300
5	Borrego a 1:1	4.000	0.550	0.371	0.051	12.560
6	Borrego a 1:2	2.667	0.367	0.263	0.036	8.490
7	Vaca a 1:1	4.970	1.031	1.078	0.224	67.850
8	Vaca a 1:2	3.313	0.688	0.809	0.168	66.660
9	Vaca a 1:3	2.485	0.516	1.254	0.260	62.290
10	Conejo a 1:1	3.750	1.126	1.576	0.473	75.870
11	Conejo a 1:2	2.500	0.750	2.044	0.614	77.220
12	Conejo a 1:3	1.875	0.563	2.358	0.708	72.150

Fuente: Elaboración Propia

En base a la información obtenida durante este proyecto, se puede indicar el posible ahorro energético que se puede obtener, el cual es de aproximadamente 0.125 kWhr/kg de excremento de vaca y de 0.351 kWhr/kg de excremento de conejo, lo que representaría que se dejan de emitir 0.084 kg de CO₂/kg de excremento de vaca y 0.234 kg de CO₂/kg de excremento de conejo.

5 Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional Autónoma de México, por el apoyo recibido para la realización del proyecto de investigación, a través de los programas: UNAM-DGAPA-PAPIIT-IT104212-2, UNAM-DGAPA-PAPIME-PE101912 y UNAM-DGAPA-PAPIME-PE101218

6 Conclusiones

Antes del inicio de las pruebas se esperaba que el excremento de vaca fuera el que produjera una mayor cantidad de biogás, debido a que tiene una relación C/N cercana al valor ideal y que el excremento de ganado vacuno es rico en elementos como calcio, magnesio y fósforo, en cambio se comprobó que las excretas de conejo pese a su baja relación C/N presentan un mejor rendimiento que el excremento de vaca. También se observó mediante la experimentación que tanto la temperatura como el pH tienen una gran relevancia durante la descomposición de los residuos pudiendo incluso afectar a tal grado que detienen por completo la producción de biogás. Con el desarrollo del proyecto se pudo cuantificar la producción de biogás que se puede generar en la FES Cuautitlán, así como el posible ahorro de energía que se puede tener al emplear el biogás como combustible para otras aplicaciones como en los laboratorios de la Unidad de Investigación Multidisciplinaria, donde emplean gas para sus procesos o en el gimnasio de la escuela para el calentamiento del agua de las regaderas.

7 Referencias

- Buxadé, Carlos. *Zootecnia Tomo IV, Bases de producción animal*. 1ª edición. Mundi – Prensa, España, 1995.
- Campos, Elena; Illa, Joseph; et al. *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas*. 1ª edición. Agencia de residuos de Cataluña, 2004.
- Chang, Raymond. *Química General*. 7ª edición, McGRAW Hill, 2002.
- Deublein, Dieter; Steinhauser, Angelika. *Biogas from waste and renewable resources*. 1ª edición, Alemania, WILEY – VCH, 2008.
- Guevara Vera, Antonio. *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. 2ª edición, Perú, 1996.
- Guillen, Omar. *Energías Renovables una perspectiva ingenieril*. 1ª edición, México, Trillas, 2004.
- Moncayo Romero, Gabriel. *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. 1ª edición, España, Aqualimpia Beratende Ingenieure. 2008.
- Moncayo Romero, Gabriel. *Manual de mantenimiento de biodigestores*. 1ª edición, España, Aqualimpia Beratende Ingenieure, 2013.
- [1] Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en la Zona Metropolitana del Valle de México. Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud. Organización Panamericana de la Salud /Organización Mundial de la Salud. Departamento del Distrito Federal/Secretaría de Obras y Servicios. Dirección General del Estado de México/Secretaría de Ecología.
- [2] Balance Nacional de Energía 2016. Secretaría de energía.
- [3] Amarely Santana and B Pound. The production of biogas from cattle slurry, the effects of concentration of total solids and animal diet. *Trop Anim Prod*. 5 (2): 130 – 135, 1980.

- [4] San Thy, T R Preston and J Ly. Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent. *Livestock Research for Rural Development* 15 (7): 1 – 24, 2003.
- [5] K.J. Chae, Am Jang, S.K. Yim, In S. Kim. The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology* 99: 1 – 6, 2008.
- [6] Stephanie Lansing, Raul Botero Botero, Jay F. Martin. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology* 99: 5881–5890, 2008.
- [7] A.D. Atem, M.E. Indiveri, S. Llamas. Biomass storage for further energy use through biogas production. *international Journal of hydrogen energy* 35: 6048 – 6051, 2010.
- [8] Ivet Ferrer, Marianna Garfi, Enrica Uggetti, Laia Ferrer-Martí, Arcadio Calderon, Enric Velo. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and bioenergy* 35: 1668 – 1674, 2011.
- [9] Sung-Mok Lee, Geun Hyub Kim, Jae-Hwa Lee. Bio-gas production by co-fermentation from the brown algae, *Laminaria japonica*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18: 1512–1514, 2012.
- [10] M.S. Ak, M. Muz, O.T. Komesli, C.F. Gökçay. Enhancement of bio-gas production and xenobiotics degradation during anaerobic sludge digestion by ozone treated feed sludge. *Chemical Engineering Journal* 230: 499–505, 2013.
- [11] González-González, A., et al., Energy self-sufficiency through hybridization of biogas and photovoltaic solar energy: an application for an Iberian pig slaughterhouse, *Journal of Cleaner Production*. 65: 318–323, 2013.
- [12] Hernández Gómez Víctor Hugo, Olvera García Omar, Espinal Arellano Juan Carlos y Morillón Gálvez David. Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan. *Revista de Sistemas Experimentales* 2016, 3-8: 36-52. ISSN: 2410-3950. Bolivia.
- [13] Hernández Gómez Víctor, Olvera García Omar, Guzmán Tinajero Pedro y Morillón Gálvez David. Dimensionamiento de dos biodigestores para la producción de metano en la FES Cuautitlán, empleando la materia fecal de conejos y vacas. *Revista del Desarrollo Tecnológico* 2017, 1-3: 44-53. España.