

Evaluación de la factibilidad de las mezclas de residuos orgánicos para la producción de biogás

Feasibility of organic waste mixtures for biogas production

Enmanuel Casals Pérez¹, Jesús Manuel Guzmán Chinaea²

¹Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos. Calle 17 esq. Ave 46 s/n Reparto Reina, Cienfuegos, Cuba.

²Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas Km 4, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

*Autor de correspondencia: ecperez@gestion.ceac.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 10 junio 2019 **Aceptado:** 16 octubre 2019 **Publicado:** 17 febrero 2020

Resumen

La alta producción de residuales debido al desarrollo social y económico ha generado graves problemas ambientales. El objetivo de la presente investigación es estudiar la mejora de la producción de biogás a partir de mezcla de residuos orgánicos en digestores. Se realizó un diseño de experimento de tres fases: selección de los residuos agrícolas, elaboración de distintas mezclas de residuos agrícolas con purín de cerdo y análisis de las mezclas realizadas. Se realizó una mezcla de residuales agrícolas a temperatura ambiente con un tiempo de retención de 60 días y la experimentación de la misma mezcla de residuos agrícolas más la adición de purín de cerdo bajo las mismas condiciones. Se obtuvo un 80% de remoción de materia orgánica para la mezcla de residuos agrícolas y un 78% para la mezcla de residuos agrícolas con purín de cerdo concluyendo que ambas mezclas son factibles para la producción de biogás.

Palabras clave: biogás, codigestión, residuos agroindustriales, purín de cerdo, mezclas.

Abstract

The high production of waste due to the social and economic development is generating serious environmental problems. The objective of the research is to study the improvement of biogas production from organic waste mixture in digesters. A three-phase experiment design was carried out: selection of agricultural waste, preparation of different mixtures of agricultural waste with pig slurry and analysis of the mixtures made. A mixture of agricultural residues at room temperature was carried out with a retention time of 60 days and the experimentation of the same mixture of agricultural residues plus the addition of pig slurry under the same conditions. There was an 80% removal of organic matter for the mixture of agricultural residues and 78% for the mixture of agricultural residues with pig slurry concluding that both mixtures are feasible for the production of biogas.

Keywords: biogas, codigestion, agroindustrial waste, pig slurry, mixtures.

1. Introducción

Los cambios socioeconómicos de las últimas décadas, altas concentraciones de población en núcleos urbanos, desarrollo de la industria agroalimentaria, intensificación de las explotaciones ganaderas y prácticas consumistas, han propiciado la producción de grandes cantidades de residuos orgánicos que ocasionan graves problemas ambientales [1,2]. Cada día la industria va tomando conciencia de la necesidad de reutilizar los recursos y materias secundarias provenientes de sus procesos con el fin de optimizar la producción. Encontrar una actividad industrial que haga de estos desechos una fuente de ingresos beneficia a las partes involucradas: productores y municipios encargados de la recolección y disposición final del desecho. Con desechos de frutas se puede producir, mediante el proceso de digestión anaerobia, bio-fertilizante de muy bajo costo y de grandes propiedades, además de biogás, una fuente de energía. Por lo tanto se hace necesario encontrar una tecnología apropiada para disminuir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera [3].

Cuba no queda excluida de este desarrollo, aunque en menor medida, comparado con otros países, también tiene una gran repercusión en el medio ambiente y en la sociedad por las altas cargas de contaminante orgánico [4]. Es por eso que algunas instituciones de diferentes partes de la región han realizado diversos estudios en cuanto al tratamiento de estos desechos orgánicos para la producción de biogás y minimizar en una gran medida la contaminación provocada por estas industrias, así como aprovechar la utilización de esta tecnología, tanto para la agricultura como para la producción de energía eléctrica. En Cienfuegos distintas instituciones en conjunto con la Universidad “Carlos Rafael Rodríguez”, han llevado a cabo diferentes investigaciones para la utilización de dicha tecnología con el propósito de mejorar la producción de biogás empleando diferentes mezclas de purín de cerdo con residuos agroindustriales [5].

Estos estudios se realizaron con diferentes residuos de la industria alimenticia como residuos de la elaboración de pulpa de guayaba y cachaza. En ellos se llevaron a cabo una serie de experimentos en discontinuo, con el objetivo de determinar el máximo potencial de metano y la biodegradabilidad de estos residuos, mediante los cuales se demostró que en todos los casos las mezclas evaluadas en los diferentes experimentos logran un valor de metano superior al 60%.

La solución de tratamiento a los residuales en forma anaerobia, es más efectiva y controlada que las soluciones tradicionales de tratamiento que se acostumbra a hacer mediante lagunas de oxidación, vertimientos a cañadas, ríos o al mar directamente en algunos casos [6]. En Cuba existen evidencias de vertimientos biodegradantes que han destruido bancos de ostiones, bancos de mangles, muertes de peces en ríos y presas, contaminación de agua para uso social, destrucción de la vida marina en la desembocadura de los ríos contaminados.

En Cuba, el biogás es visto, además de como fuente renovable de energía, como un componente para la elaboración de bioabono en una agricultura orgánica y armónica con el medio ambiente [7]. Según expertos del Grupo cubano de Biogás, la primera aplicación industrial del biogás en el país data de 1940, cuando se construyeron dos biodigestores para procesar los residuales de una fábrica de cervezas en La Habana. El uso del biogás creció de forma acelerada a partir de 1980 y se construyeron biodigestores de las tecnologías de campana flotante y de cúpula fija, para la cocción de alimentos y el consecuente ahorro de combustibles. El biogás producido se destina a cubrir bajas demandas energéticas, como la cocción de alimentos y alumbrado. Actualmente el potencial de biogás se estima en más de 152 000 toneladas de petróleo equivalente a partir de diversos tipos de vertimientos y residuos con que cuenta el país y su impacto ha estado dirigido al sector rural y a los pequeños agricultores [8].

Las proyecciones previstas hasta el 2020 establecen la fabricación de mil biodigestores por año. Las estimaciones de los especialistas indican que entre 4 000 y 8 000 personas en el medio rural se han beneficiado de la cantidad de biodigestores que funcionan en el país. La explotación del biogás aporta un estimado de 152 000 toneladas equivalentes de petróleo (TEP) y su impacto ha estado dirigido al sector rural y a los pequeños agricultores. El 90% corresponde a biodigestores en explotaciones de pequeña escala que les garantiza la satisfacción de las necesidades domésticas como la cocción de alimentos, electricidad y procesos industriales a pequeña escala [8].

Otra vía es captar el biogás que se produce en los rellenos sanitarios debido a la descomposición de la materia orgánica, experiencia que ya se aplica en la localidad habanera de Marianao. Fuentes especializadas del Grupo cubano de Biogás aseveran que el potencial de Cuba supera los 400 millones de metros cúbicos anuales, y si se aprovechara de manera adecuada, se podría instalar una potencia de generación eléctrica de 85 MW y producir más de 700 GW por hora al año. Así se evitaría emitir más de tres millones de toneladas de dióxido de carbono y se ahorrarían unas 190 000 toneladas de petróleo. Además, se obtendrían unas dos millones de toneladas de abono orgánico al año y se reduciría la carga contaminante.

La producción de biogás tiene tres ventajas particulares: los desechos orgánicos son transformados en biogás cuyo principal componente es metano, se reduce la masa de desperdicio y el efluente del digestor, llamado biol, puede ser utilizado como fertilizante. La digestión anaerobia de la materia orgánica produce gases que representan del 5 al 10% del total de la materia, el cual puede ser utilizado como una fuente directa de energía. El resto se conserva en forma de lodo que tiene altos contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio, materiales esenciales para el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, puede ser utilizado como fertilizante después de ser sometido a un proceso de estabilización [9].

Este residual en forma de lodo también conocido como biol presenta varias ventajas en su uso como fertilizante frente al uso de fertilizantes químicos, debido a que el lodo contiene los nutrientes en formas que no son biodisponibles inmediatamente. Esto quiere decir que los nutrientes se liberan en el tiempo mediante ciertos procesos naturales de descomposición de materia orgánica en los suelos. De esta forma la nutrición que recibirán las plantas será lenta y continua. Además, se incrementa el contenido de humus en el suelo, mejorando la estructura y textura del terreno. Con esto se facilita la aireación, la formación de depósitos cambia, y la capacidad de retención e infiltración del agua mejora. El fertilizante orgánico permite el ahorro de compra de otros abonos convencionales sin disminución de la producción de los campos. Inclusive la producción se incrementa comparada con los suelos no abonados o abonados con fertilizantes químicos [10].

El objetivo de la presente investigación es evaluar la factibilidad de la producción de biogás a partir de la codigestión de mezclas de distintos residuales agroindustriales y purín de cerdo para contribuir a la eficiencia en los reactores.

2. Materiales y Métodos

Se aplican herramientas para la gestión de los procesos y las técnicas estadísticas como: el manejo de la información (recopilación, registro, procesamiento y representación de datos con la ayuda del Excel). También se aplican experimentos, métodos químicos y análisis de laboratorio.

El diseño de experimentos se desarrolla en varias fases experimentales. La primera fase experimental consiste en la selección de los residuos agrícolas para producir biogás (cascarilla de arroz, bagazo de caña, mazorca de maíz y cachaza). La segunda fase experimental es la elaboración

de distintas mezclas de residuos agrícolas con purín de cerdo para encontrar la mayor producción de biogás en los biorreactores discontinuos. Esta fase experimental consta de dos experimentos; la experimentación de la mezcla de residuos agrícolas conformada por un 32% de cachaza, 23,3% de cascarilla de arroz, 39,5% de bagazo de caña y 5,5% de maíz, a temperatura ambiente y con un tiempo de retención de 60 días (E1) y la experimentación de la mezcla de residuos agrícolas más la adición de purín de cerdo para el mismo tiempo de retención (E2) con 22,6% de cachaza, 17% de cascarilla de arroz, 28,3% de bagazo, 3,9% de maíz y 28,3% de purines de cerdo. En la tercera fase se realizan los análisis pertinentes a cada una de las mezclas. Estos análisis de laboratorio se realizan en los laboratorios del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cienfuegos (INRH).

Los análisis físico-químicos que se llevan a cabo durante la experimentación sirven para evaluar el estado de los reactores en las distintas etapas y dar un seguimiento a la degradación anaerobia, así como para realizar los cálculos para determinar la producción de biogás y de metano. Los análisis efectuados son de demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), medición de pH y demanda biológica de oxígeno (DBO). Los sustratos seleccionados tales como la cachaza y el bagazo fueron recolectados de la industria dedicada a la producción de azúcar, situada en el batey “14 de Julio”. La cáscara de arroz fue recolectada de un molino ubicado en el municipio de Palmira de Cienfuegos y el maíz y purín de cerdo fueron recolectados de la Empresa Genético Porcino de Cienfuegos.

Construcción de los biorreactores

Para la realización de los experimentos correspondientes a este estudio, fueron necesarios una serie de materiales los cuales se mencionan a continuación:

Se utilizaron dos recipientes de vidrio de 5 L cerrados como reactores simulando el proceso anaerobio de la mezcla. Estos recipientes fueron sellados con tapones de caucho para lograr hermeticidad. Estos fueron horadados para introducir el termómetro y un tubo de vidrio el cual permitirá la conexión al manómetro diferencial mediante una manguera. La balanza técnica se utilizó para controlar las masas a utilizar en el digestor de inóculo y de sustrato. Estos experimentos se realizaron a temperatura ambiente y durante un tiempo de retención de 60 días. Periódicamente se tomaron muestras de la fracción líquida, tanto al inicio de la codigestión como al final de la misma, donde se realizó una analítica completa de las muestras (Tabla 1).

Tabla 1. Ensayos analíticos para el análisis de las muestras

Método de ensayo		
Ensayo	Nombre	Documentación y método de ensayo
pH	Potencial de Hidrógeno	PA01, Método Eléctrico
DBO ₅	Demanda Biológica de Oxígeno	PA12, Prueba de DBO – 5 días
DQO	Demanda Química de Oxígeno	PA11, Método acelerado autoclave. Muestras bajo presión con dicromato
ST	Sólidos Totales	PA14, Método de evaporación a sequedad en la estufa durante 24 h de 103°C a 105°C
STF	Sólidos Totales Fijos	PA14, Sólidos fijos y volátiles incinerados a 500°C

Formulación del sustrato

En las tablas 2 y 3 se muestran las formulaciones de las mezclas llevadas a cabo en los reactores discontinuos a escala de laboratorio, donde X es la masa de cada componente, C y N representan el

porcentaje de carbono y nitrógeno, respectivamente y C/N es la relación de carbono-nitrógeno que presenta la mezcla.

Tabla 2. Experimento 1 (E1), mezcla de residuos agrícolas

	Cachaza	Arroz	Bagazo	Maíz	Total
X(g)	800	590	1 000	140	
C (%)	0,79	0,8	0,9	0,85	2 123
N (%)	0,021	0,006	0,005	0,42	84,14
C/N	25,23				

Sólidos Totales (g)	Cantidad de agua teórico a añadir (mL)	Volumen total (mL)
2 530	5 060	7 590

Tabla 3. Experimento 2 (E2). Mezcla de residuos agrícolas más purín

	Cachaza	Arroz	Bagazo	Maíz	Purín	Total
X(g)	800	590	1 000	140	1 000	
C (%)	0,79	0,8	0,9	0,85	0,45	2 573
N (%)	0,021	0,006	0,005	0,42	0,025	109,14
C/N	23,58					

Dado que todos los residuos agrícolas para formar la mezcla son de composición seca, la cantidad de agua real añadida fue 19 350 mL para obtener una mezcla homogénea, por lo que el volumen total fue de 21 880 mL. Para la mezcla del experimento 2 se utilizó la misma composición del experimento 1 más la adición de purín de cerdo.

Para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la codigestión de la mezcla de distintos tipos de residuos orgánicos, es conveniente combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimiento y de distintas velocidades de generación; también es conveniente agregar las materias primas ricas en nitrógeno a las materias primas de alta relación C/N, a fin de disminuir esta relación.

La relación de C/N se calculó aplicando la siguiente ecuación para trabajar en un intervalo óptimo [11]:

$$K = \frac{C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + (...)}{N_1X_1 + N_2X_2 + N_3X_3 + (...)} = \frac{\sum C_iX_i}{\sum N_iX_i} \quad (1)$$

Siendo:

K Relación de carbono y nitrógeno.

C_i Porcentaje de carbono de cada componente.

N_i Porcentaje de nitrógeno de cada componente.

Cálculos para la producción de biogás y su proporción en metano

$$\text{Biogás producido} = \text{Volumen del reactor} * \text{Índice}_{(\text{rendimiento teórico del gas})} \quad (2)$$

$$\text{Rendimiento teórico del gas} = \text{Rendimiento de } CH_4 + CO_2 \quad (3)$$

$$CH_4 \text{ producido} = \text{Biogás producido} * \text{Índice}_{(\text{rendimiento teórico de metano})} \quad (4)$$

Producción real de metano y biogás

La producción real de metano y biogás según los indicadores de producción de biogás de los diferentes sustratos y los valores iniciales y finales de DQO y DBO₅ fueron calculados aplicando las siguientes ecuaciones:

Producción real de biogás

$$P_b = \frac{\sum (C_i * I_i)}{N} \quad (5)$$

Siendo:

C_i Volumen del compuesto en la mezcla.

I_i Indicador de producción de biogás del compuesto correspondiente en la mezcla.

N Cantidad de compuestos en la mezcla.

Producción real de metano

$$P_m = P_b * \left[\frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} * 100 \right] \quad (6)$$

Siendo:

P_b Producción real de biogás.

DQO_i Demanda química de oxígeno inicial.

DQO_f Demanda química de oxígeno final.

$$\text{Eficiencia real} = \frac{\text{Producción real de metano}}{\text{Producción real de biogás}} \quad (7)$$

3. Resultados y Discusión

En este experimento se dispuso de dos digestores anaerobios en discontinuo: uno era el digestor que contenía la mezcla de residuos agrícolas en el que tenía lugar la codigestión anaerobia de cachaza, arroz, bagazo y maíz, y otro en el que se estudió la codigestión anaerobia de la misma mezcla antes mencionada más la adición de purín de cerdo. Se tomaron dos muestras en cada reactor correspondiendo al tiempo cero y final de cada experimento para evaluar el proceso de codigestión anaerobia. El tiempo de retención hidráulica (TRH) de cada reactor fue de 60 días. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio para cada parámetro analizado.

A partir de estos resultados, y teniendo en cuenta los indicadores de producción de biogás de los diferentes residuos se calculó la producción real de biogás y de metano producida en los digestores discontinuos para las distintas mezclas.

Los niveles de pH de los reactores batch, al inicio y al fin de la codigestión, muestran la cantidad de ácidos producidos durante la codigestión de los residuales. Estos niveles de pH se deben a la producción de ácidos orgánicos de baja masa molar, los cuales son transformados en ácido acético y dihidrógeno fundamentalmente, los que son consumidos por las metanógenas, aumentando así el pH [5].

Tabla 4. Resultados de los ensayos de laboratorio

Ensayo	E1		E2	
	Tiempo 0	Tiempo final (60 días)	Tiempo 0	Tiempo final (60 días)
DQO (mg/L)	4 307	850	4 161	921
DBO ₅ (mg/L)	3 975	580	2 969	630
pH	6,30	7,45	6,41	7,55
ST	38 662	3 470	40 714	3 891
STF	1 356	1 057	1 576	1 157

Se observa en la Figura 1 que el comportamiento del pH para ambos experimentos, durante el transcurso del proceso de codigestión anaerobia, osciló en el intervalo óptimo, el cual es considerado de 6,6 a 7,6 [12]; desviándose ligeramente del límite inferior de dicho rango. Los ácidos grasos volátiles a estos valores de pH están mayoritariamente en su forma ionizada, que no es tóxica para las bacterias y propicia un aporte de iones H^+ que regularía la tendencia a pH mayores a 7 [13]. Los intervalos de pH obtenidos en el proceso de experimentación, propician las condiciones para que los microorganismos actúen a altas velocidades y se obtenga una producción de metano en menor cantidad de tiempo [14]. Valores del pH por debajo de 5 y por encima de 8, inhiben el proceso de fermentación anaeróbica ya que los distintos organismos que intervienen en cada fase son diferentes y ha de establecerse un equilibrio entre la producción de ácido y su regresión, para que estos organismos puedan coexistir dentro del digestor y se den las posibilidades ambientales correctas para su desarrollo [12]. Valores promedio de pH iguales a 7,44 similares a los obtenidos en el experimento de la mezcla de residuos agrícolas más purín de cerdo, se presentan en un estudio donde se valoró la codigestión de biomasa de contenido ruminal de origen bovino a diferentes porcentajes de cargas y temperatura [15].

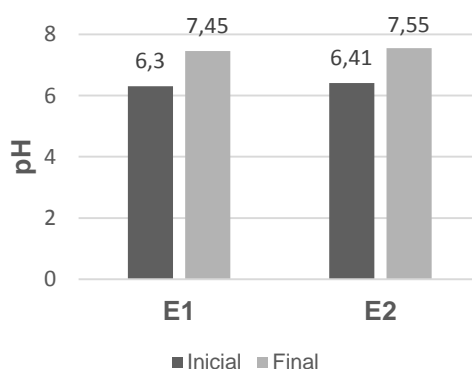


Fig.1 Comportamiento del pH al inicio y al final de la codigestión

En la Figura 2 se observan los niveles de DQO al inicio y al final de la codigestión. Durante la codigestión anaerobia los niveles de DQO disminuyeron en ambos experimentos indicando una buena degradación de la materia orgánica. Obteniéndose, para el experimento de residuos agrícolas, un 80% de remoción de materia orgánica el cual es muy satisfactorio debido al largo tiempo de retención que se le impuso a la muestra y un 78% de remoción de materia para el experimento de residuos agrícolas más purín de cerdo.

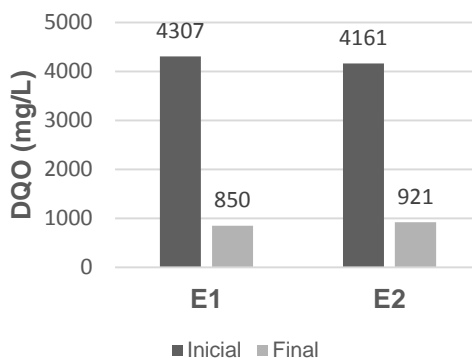


Fig.2 Niveles de DQO al inicio y al final de la codigestión

Como se aprecia en la Figura 3 los valores de DBO_5 finales para ambos experimentos es de 580 y 630 mg/L respectivamente. La mezcla de residuos agrícolas más purín de cerdo presentó valores más alto de DBO_5 debido a la carga orgánica ya presente en el purín de cerdo en comparación con la mezcla de residuos agrícolas. Estos datos indican que el biol resultante de estas mezclas no puede ser usado como fertilizante debido a la cantidad de materia susceptible de ser oxidada por los microorganismos, ya que para su uso estos valores deben estar por debajo de 95 mg/L. Esto se comprueba con la relación existente entre la DBO_5 y la DQO para los valores finales obtenidos para ambas mezclas, teniendo un valor de 0,68 para cada caso mayor que 0,4, correspondiendo con un residual altamente biodegradable. Por lo tanto, se considera el biol como un residual del proceso de codigestión.

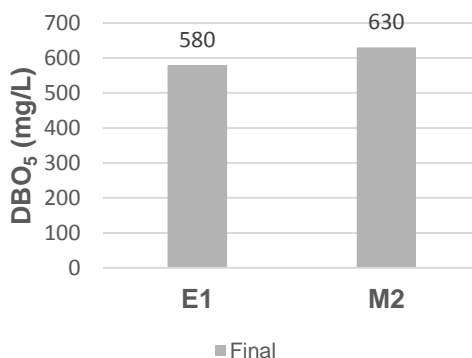


Fig.3 Valores de DBO_5 al final de la codigestión

En la Figura 4 se muestra la cantidad de sólidos iniciales presentes en las mezclas. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8 a 12% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales [11]. El resultado obtenido de los análisis indica un alto contenido de sólidos el cual sobrepasa los límites establecidos para procesos en digestores semicontinuos pero no alcanzó los intervalos de operación para procesos discontinuos encontrándose en un valor intermedio, lo que indica que el contenido de agua fue poco para la máxima degradación de la materia orgánica. El agua contenida en los residuos no produce biogás y por tanto ocupa un volumen no aprovechado en el digestor. Sin embargo, resulta imprescindible para que el proceso fermentativo se desarrolle adecuadamente a nivel microbiológico. Así pues, debe alcanzarse un equilibrio entre la productividad de biogás asociada al aporte de sólidos y la humedad necesaria para la codigestión [16].

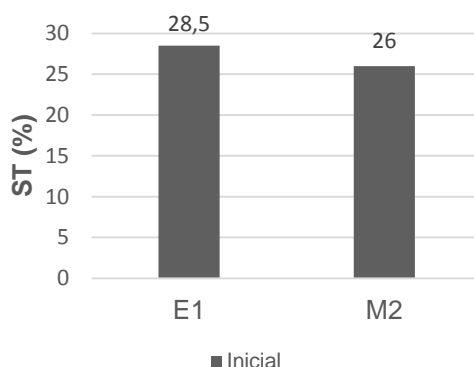


Fig.4 Porcentaje de sólidos totales en las mezclas experimentales

Análisis de la producción de biogás y proporción de metano

Como para todos los reactores en discontinuo se cumple que el volumen del gas dentro del reactor siempre ocupa un 25% quedando un 75% ocupado por la mezcla, lo que en términos de litros representa 3,75 L [17], y la composición del biogás contiene un 60% de metano [8], la producción teórica de biogás y de metano obtenida aplicando las ecuaciones (2) y (4) fue de 1,25 L y 0,75 L respectivamente. Las producciones reales de ambos componentes se calcularon según los indicadores de producción de biogás de los diferentes residuos que conformaban las distintas mezclas y la DQO obtenida, tanto inicial como final, en ambos experimentos, aplicando las ecuaciones (5) y (6). En los experimentos se ocupó un volumen de 2 L alcanzando un 40% de reactor y quedando un 60% de volumen para el gas, por lo que al calcular la producción real de biogás como de metano es de esperar que sea menor que la teórica. En este sentido se obtuvo una mejor eficiencia en la obtención de biogás y metano en la mezcla de residuos agrícolas ligeramente superior a la mezcla con purín de cerdo añadido.

La menor eficiencia obtenida en la mezcla de residuos agrícolas más la adición de purín de cerdo está relacionada con los bajos porcentajes de carbono y nitrógeno aportados por este último a la mezcla, provocando una disminución en la relación de C/N, para las cantidades añadidas (1 000 g), obteniendo valores cerca del límite inferior para el intervalo óptimo de este parámetro, así como por su alto contenido en nitrógeno amoniacal y agua.

Tabla 5. Producción real de biogás y metano

Experimento			Producción real de biogás	Producción real de metano	Eficiencia
Mezcla agrícola	de	residuos	0,2256 L	0,18 L	80%
Mezcla agrícola	de	residuos	0,2565 L	0,20 L	78%
	más	purín de cerdo			

4. Conclusiones

Mediante la metodología de trabajo llevada a cabo en esta investigación se obtuvo una codigestión de mezclas de diferentes cantidades de residuales agroindustriales mezclados entre sí y con purín de cerdo permitiendo la caracterización química de las mezclas empleadas en el estudio, para conocer el pH, DQO, DBO, ST y STF, de cada una de ellas. A partir de la evaluación de los resultados

obtenidos a nivel de laboratorio se puede decir que ambas mezclas son factibles para la producción de biogás puesto que las mezclas proporcionaron el pH requerido para la operación del proceso manteniéndose en un rango de 6,4-7,5 y la mayoría de los parámetros de control del proceso de codigestión anaerobia estuvieron dentro de los rangos de operación. Esto permitió lograr un porcentaje de remoción de materia orgánica superior al 60% para ambas mezclas, y por ende altos rendimientos en la producción de biogás y de metano. El porcentaje de sólidos iniciales en los dos experimentos no cumplió con el rango óptimo de este parámetro para procesos en discontinuo, aunque los valores obtenidos no impidieron la obtención de biogás.

Referencias

1. Moposita, D.A., et al., *Intensificación de los sistemas agropecuarios y su relación con la productividad y eficiencia. Resultados con su aplicación*. Revista de Producción Animal, 2017. **29**(2): p. 57-64.
2. *Engormix*. La comunidad agropecuaria online más grande del mundo. 2009. <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/intensificacion-sistemas-ganaderos-contaminacion-t39069.htm>.
3. Vargas, Y.A., et al., *Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente*. Revista Facultad de Ciencias Básicas, 2018. **14**(1), 14 p. 59-72.
4. Francesena, Y., *Impacto ambiental provocado por efluentes de instalaciones de biogás de pequeña y mediana escala en las provincias de la región central de Cuba*. Tesis de Diploma. 2016, Santa Clara.
5. Sarmiento, Y., *Optimización de la digestión anaerobia de la planta de biogás de la Empresa Genético Porcino de Cienfuegos*. Tesis de Diploma. 2014, Cienfuegos.
6. Tirado, D.F., et al., *Biotratamientos de aguas residuales en la industria láctea*. Revista Producción +Limpia, 2016. **11**(1): p. 171-184.
7. Hernández, C.M., et al., *Tratamiento y utilización de efluentes de instalaciones de biogás como abonos orgánicos, revisión y análisis*. Revista Centro Agrícola, 2018. **45**(2): p. 83-92.
8. Suarez, D.A., Situación actual de América respecto a los residuos biodegradables y el biogás. 2018. <https://www.ceddet.org/wp-content/uploads/2018/03/ARTICULO-BIOGAS-1.pdf>.
9. Infocampo. 2019. <https://www.infocampo.com.ar/los-beneficios-de-tener-biodigestores-en-los-establecimientos-productivos/>.
10. Mamani, E., et al., *Aplicación de biofertilizantes foliares en el cultivar Huaycha (Solanum tuberosum subsp. andigena) en los valles interandinos de Bolivia*. Revista Latinoamericana de la Papa, 2016. **20**(2): p. 14-25.
11. Soto, *Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas y de producción de biodiésel*. Tesis de Diploma. 2016, Tenerife.
12. Cossío, A.S.M., *Estudio técnico sobre biodigestores anaeróbicos, aplicado al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos municipales*. Tesis de Diploma. 2018, Cantabria.
13. Crombet, S., et al., *Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria*. Revista colombiana de Biotecnología, 2016. **18**(1): p. 49-56.
14. Martín, C.S.J., *Obtención de biogás a partir de residuos agrícolas activados con agentes inoculantes*. Tesis de Diploma. 2018, Tenerife.
15. Sánchez, G.C., *Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperaturas diferenciales*. Tesis de Maestría. 2016, Manizalez.
16. Chocho, A., *Valorización de residuos de Jatropha Curcas: energética, química y/o mecánica*. Tesis de Diploma. 2016, Tenerife.
17. Levenspiel, O., *Chemical reaction engineering*. Wiley, 3ra Edición, 2004.