

Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo

Anaerobic codigestion of the rice drying residue and pig manure in batch test

Dr.C. Lisbet Mailin López-González^I, Ing. José Miguel Ruiz-Manso^{II}, Dr.C. Luz María Contreras-Velásquez^{III}, Dr.C. Julio Pedraza Garciga^I, M.Sc. Orestes Hermida-García^I

lisbet@uniss.edu.cu

*^ICentro de Estudios de Energía y Procesos Industriales. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, Sancti Spíritus. Cuba; ^{II}Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Camagüey, Cuba
^{III}Universidad Metropolitana de Quito, Ecuador*

Resumen

El desarrollo del biogás en Cuba, ha estado dirigido fundamentalmente al tratamiento de excretas de producciones pecuarias y residuales de algunas industrias, con el fin de disminuir su carga contaminante. Sin embargo, otros residuos con un alto potencial como los lignocelulósicos han sido escasamente estudiados. El presente trabajo tiene como objetivo determinar el potencial de biogás y la cinética del proceso de la digestión anaerobia del residuo del secado del arroz (RS) y su codigestión con residuos porcinos (RP). El ensayo se realizó en reactores de 2L en régimen discontinuo a 38 ± 2 °C. Se probaron los sustratos en monodigestión y dos mezclas del RS y el RP. El residuo porcino tuvo el mayor rendimiento de metano experimental con un valor de 488,87 L CH₄/kg SV, pero la menor velocidad de producción de metano con un valor de 40,98 L CH₄/kg SV d. La codigestión del residuo del RS y el RP tuvo un efecto sinérgico para la mezcla RS₉₅:RP₅, con un incremento en un 18 % del rendimiento de metano respecto al valor esperado por la contribución individual en la mezcla.

Palabras clave: digestión anaerobia, biogás, residuo porcino, residuo del secado del arroz.

Abstract

The biogas production in Cuba has been addressed to the treatment of pig residues and wastewater generated from some industries, with the aim to reduce the pollutant load. However, other residues with a high potential to biogas production as the lignocellulosic has been scarcely studied. The aim of this work is to determine the methane yield and the kinetic of the anaerobic digestion process of the rice straw drying residue (RS) and the pig residue (RP). The experiment was carried out in 2 L reactors at batch regime to 38 ± 2 °C. The substrates were tested in monodigestion and two blends of RS and RP. The highest experimental methane yield of 488,87 L CH₄/kg SV was found for RP, but with the lowest methane production rate with a value of 40,98 L CH₄/kg SV d. The codigestion of RS and RP had a synergetic effect for the mixture RS₉₅:RP₅, with an increase of 18 %, in comparison with the expected value by the individual contribution in the mixture.

Keywords: anaerobic digestion, biogas, pig residue, rice straw drying residue.

Introducción

El desarrollo del biogás en Cuba, ha estado dirigido fundamentalmente al tratamiento de excretas de producciones pecuarias y residuales de algunas industrias, con el fin de disminuir su carga contaminante. Sin embargo, otros residuos existentes en el país, han sido escasamente estudiados, y no son considerados como sustratos potenciales a pesar de su alta disponibilidad, entre los que se encuentran los residuos agrícolas y del procesamiento del arroz, tercer cultivo agrícola de importancia mundial en términos de área total cultivada y de producción.

Específicamente en la región central de Cuba existe una elevada producción de arroz concentrada en la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” del municipio La Sierpe. Esta cuenta con un total de 83 875 ha de tierra, de las que más de 30 000 ha se dedican al cultivo del arroz, con una producción de 122 000 t de arroz húmedo en el 2018.

Durante el proceso productivo se generan como residuos la paja de arroz, la cáscara de arroz, y las impurezas del secado. Se generan 0,04 t de impurezas o residuos del secado por tonelada de arroz húmedo, cuyo destino es ser depositado en grandes pilas, lo que constituye un problema ecológico. Este residuo está constituido por paja de arroz, cáscara de arroz y granos de arroz fraccionados. La digestión anaerobia de este residuo ha sido escasamente estudiado, y solo se encontró un trabajo reportado por [2] del potencial de producción de biogás en base al contenido de sólidos volátiles añadidos (SV), a régimen mesofílico y termofílico de 0,32 y 0,36 m³/kg SV, respectivamente.

Al ser considerado este un material lignocelulósico, con dificultad para la degradación anaerobia, en la literatura aparecen varios métodos de pretratamiento [3] y/o codigestión con otros residuos [4] con vistas a incrementar su rendimiento de metano y biogás.

El uso de cosustratos, en la mayoría de los casos mejora el rendimiento de biogás, debido a sinergismos positivos establecidos por el medio de la digestión, y la aplicación de nutrientes en falta, en alguno de los sustratos. Se ha reportado su uso para obtener un mejor balance en parámetros de alimentación tales como: relación C/N, pH/alcalinidad, macro y micronutrientes,

compuestos inhibidores/tóxicos, materia orgánica biodegradable, materia seca, etcétera [5].

La codigestión ha sido aplicada con resultados positivos a un amplio rango de residuos, entre los que se destacan la mezcla de residuos porcinos, con un alto contenido de $N\ NH_4^+$, y residuos agrícolas, como es el caso de la paja de arroz[2] excreta de caballo[6], paja de maíz[7] y silage de yerba[4]. El residual porcino es un sustrato base excelente para la codigestión anaeróbica, debido a su alto contenido de agua, lo que facilita reducir el contenido de materia seca de sustratos sólidos como el residuo de secadero y por tanto su bombeo y agitación durante el proceso de digestión anaerobia, también su alta capacidad buffer, con lo cual se evitan fluctuaciones del pH, y su alto contenido de nutrientes generan un alto crecimiento microbiano.

La mezcla del residuo del secado del arroz y los residuales porcinos se presenta como una alternativa atractiva para su implementación, al estar ubicado un centro porcino cercano a la planta de secado del arroz de la empresa arrocera “Sur del Jíbaro”. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar el proceso de codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y la excreta porcina en sistemas discontinuos.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Materiales

La biomasa empleada en el ensayo anaerobio como fuente de inóculo proviene de una planta de biogás tipo chino, la cual usa aguas residuales porcinas como sustrato. Se recolectó la biomasa activa por el tubo colocado en el fondo para extracción de lodo. El inóculo fue mantenido en condiciones anaerobias durante una semana para agotar los componentes orgánicos contenidos.

Para el ensayo anaerobio se utilizaron como sustratos el residuo del proceso de secado del arroz, proveniente del secadero de arroz de la empresa provincial de granos “Sur de Jíbaro”, perteneciente al municipio La Sierpe, de Sancti Spíritus, recolectados en el mes de abril del 2018; y residuales porcinos (excreta de cerdo), procedentes de una granja porcina cercana a dicho secadero.

A los residuos del secadero de arroz se le realizó un tratamiento mecánico, el cual consistió en moler y posteriormente tamizar, hasta alcanzar un tamaño de partículas inferior a los 2 mm. Los residuales porcinos fueron sometidos a un proceso de tamizado hasta 3 mm, para lograr homogeneidad.

Métodos analíticos

El contenido de sólidos totales (ST), SV, cenizas, pH y nitrógeno amoniacal, se determinaron de acuerdo a las normas establecidas por los métodos estandarizados.⁽⁸⁾ Hemicelulosa, celulosa y lignina fueron cuantificadas de acuerdo al método de.⁽⁹⁾

Ensayo anaerobio

La experimentación fue realizada a escala de laboratorio en reactores de polietileno de 0,002 m³ (2 L) de capacidad, a temperatura constante y controlada de 37 ± 2 °C. Para este fin se empleó un baño de agua con termóstato. En la figura 1, se muestra el esquema de la instalación experimental.

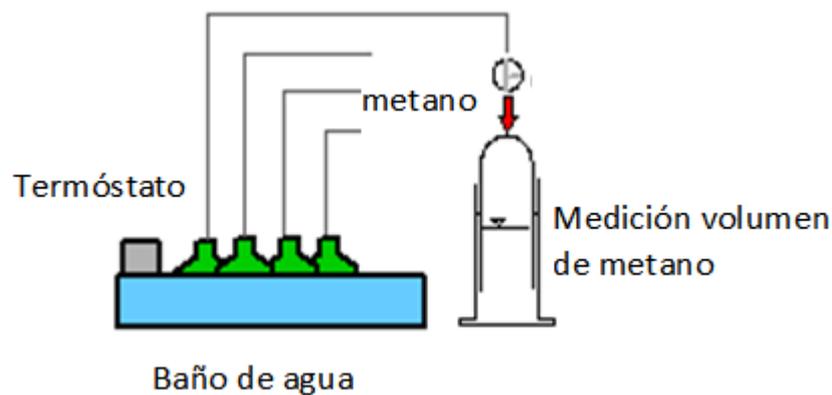


Fig. 1- Esquema de la instalación experimental para ensayos en discontinuo.

Los reactores se cerraron con tapón de goma, en el cual había una manguera para la salida del biogás y se conectaron a colectores de gas en forma cilíndrica. El líquido contenido en los colectores, consistió en una solución saturada de NaOH al 3%, para facilitar la disolución de CO₂ en agua, contabilizándose el metano obtenido, mediante el desplazamiento de líquido.

A cada reactor se le adicionó 600 g de inóculo y una cantidad determinada de sustrato para mantener una relación inóculo / sustrato de 2 (g SV/ g SV) [10]. Todos los reactores fueron agitados manualmente una vez al día.

Se evaluaron cuatro condiciones experimentales, dos para los componentes puros y las otras dos para dos variantes de mezcla, elegidas de acuerdo a la cantidad de cerdos existentes en la granja porcina cercana al secadero de arroz (300 cerdos), y la segunda, para el doble de los cerdos (600 cerdos) (tabla 1).

Tabla 1
Matriz de diseño experimental

Mezcla*	RS	RP
RS ₁₀₀ : RP ₀	100	0
RS ₀ : RP ₁₀₀	0	100
RS ₉₈ : RP ₂	92	2
RS ₉₅ : RP ₅	95	5

*En base al % de sólidos volátiles en la mezcla

Los ensayos se realizaron en triplicado. La cantidad de gas producida se midió diariamente y se registró la temperatura y presión ambiental. El proceso de digestión se detuvo después de 30 días, cuando no más de 1 % de volumen de metano diario se produjo. Los valores de rendimiento de metano se reportaron a temperatura y presión normal como litros normalizados de metano por kg de sólidos volátiles añadidos (L CH₄/kg SV).

Análisis cinético

Para la descripción del comportamiento cinético de la degradación anaerobia, se utilizaron cuatro modelos de reacciones de primer orden. Estos fueron el modelo de primer orden de Roediger, el modelo de Función Transferencial, el modelo de Hill modificado y el modelo modificado de Gompertz (ecuaciones 1-4).⁽¹¹⁾

Modelo de Roediger

$$y(t) = y_{max}[1 - \exp(-kt)] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Modelo de Gompertz modificado:

$$y(t) = y_{max} \exp \left[- \exp \left(\frac{R_m e}{y_{max}} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (\text{Ecuación 2})$$

Modelo de Función Transferencial:

$$y(t) = y_{max} \left[1 - \exp \left(\frac{-R_m (t - \lambda)}{y_{max}} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 3})$$

Modelo modificado de Hill:

$$y(t) = y_{max} \frac{t^b}{(c^b + t^b)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

La curva representa una curva exponencial del rendimiento de metano acumulativo $y(t)$ (L CH₄/kg SV) en un tiempo dado t (d). Se estima el valor del máximo rendimiento de metano (y_{max}), la constante cinética de velocidad aparente k (d⁻¹), la duración del desfase inicial (λ) en la producción de metano, la máxima producción específica de metano (R_m), el tiempo al cual la mitad del rendimiento de metano es alcanzado (c) y b es un parámetro del modelo.

El ajuste a los modelos se realizó mediante un análisis de regresión no lineal por medio del paquete estadístico STATGRAPHICS Centurión (versión 15.1).

Resultados y su discusión

Caracterización de los sustratos utilizados en el proceso de digestión anaerobia

La tabla 2 presenta los parámetros analizados al residuo del secadero (RS), residuo porcino (RP) y el inóculo. El RS tiene un alto contenido de materia orgánica, expresada en términos de SV % materia fresca (MF), con un valor de 77,1 %MF, superior al RP con 5,6 %MF, debido a la presencia de micronutrientes y macronutrientes y al agua que se le incorpora a este residual durante la limpieza de los corrales.

Sin embargo, el alto contenido de fibra del RS (44,35 %ST), dado por los componentes lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) que forman su

estructura, le aporta resistencia a este material, y puede afectar su degradación biológica.

Tabla 2
Caracterización de los sustratos utilizados en el ensayo anaerobio

Parámetros		RS	RP	Inóculo
pH		6,43	8,06	7,95
Sólidos totales	%MF	83,12	6,68	6,01
Sólidos volátiles	%MF	77,16	5,64	3,57
Sólidos volátiles	%ST	92,83	84,43	59,40
Cenizas	%ST	7,17	15,57	40,60
Nitrógeno amoniacal	g/kg	0,07	0,52	0,013
Hemicelulosa	%ST	18,31	n.a	n.a
Celulosa	%ST	19,08	n.a	n.a
Lignina	%ST	6,96	n.a	n.a

n.a: No analizado

Comportamiento cinético de la DA

La tabla 3 detalla los parámetros cinéticos obtenidos y sus estadísticos a partir del ajuste de los modelos de Roediger (MR), de Hill modificado (MH), de Gompertz modificado (MG) y de Función Transferencial (MT). Como se observa, todos los modelos se adecuaron a los datos experimentales del rendimiento de metano acumulativo con un valor de R_{aj}^2 superior a 95 %. Sin embargo, los modelos modificados de Gompertz para el RP y el de Hill para el RS y las mezclas RS+RP, lograron una mejor adecuación de acuerdo a los valores de 99 y 98% del R_{aj}^2 , respectivamente.

El error estándar de estimación fue también mejor para estos modelos con valores entre 8 y 13, en comparación con 15 y 34 obtenidos para el resto de los modelos. A medida que el modelo ajuste mejor, la suma cuadrada del error (SC_{error}) será menor y en consecuencia el error estándar de estimación también será menor. Para el caso específico del residuo porcino el comportamiento de la curva experimental se describe mucho mejor con el MG seguido por el MH, alejándose significativamente del MR, esto está dado por la fase de retardo pronunciada de este tipo de residuo, la cual no puede ser explicada por los MR y MT.

Para el residuo de secadero y sus mezclas, la tendencia de la curva es más creciente, por tanto el MG no ajusta bien los datos durante la fase de aceleración.

Por otra parte el MR, MT y el MG no muestran prácticamente ninguna producción de biogás a partir del día 16, lo cual difiere cuando se usa el MH. Para ese período, compuestos que presentan baja biodegradabilidad, como la celulosa y proteínas, son degradados, así su producción de biogás se representa mejor por el MH. Esto se explica porque se logra un mejor ajuste para el RS el cual contiene una alta proporción de compuestos lignocelulósicos.

Tabla 3
Resumen de los parámetros de los modelos cinéticos para residuo de secadero (RS₁₀₀:RP₀), residuo porcino (RS₀:RP₁₀₀) y sus mezclas (RS₉₈:RP₂ y RS₉₅:RP₅) y los parámetros de calidad del ajuste

Mezcla	Modelo	y _{max}	k	Rm	λ	b	c	R _{aj} ²	ES
RS ₁₀₀ : RP ₀	MR	314,66	0,32					96,63	15,47
	MH	320,56				1,76	2,23	98,23	11,20
	MT	313,65		105,98	0,16			97,41	15,09
	MG	305,61		72,41	0,19			95,52	17,86
RS ₀ : RP ₁₀₀	MR	761,02	0,05					95,89	34,68
	MH	547,18				2,35	8,71	98,81	18,49
	MT	666,89		44,93	0,93			96,50	31,99
	MG	505,97		40,98	2,07			99,36	13,42
RS ₉₈ : RP ₂	MR	303,85	0,32					97,68	12,09
	MH	324,37				1,32	2,22	98,81	8,81
	MT	303,99		96,38	0,04			97,68	12,33
	MG	298,06		56,69	0,35			95,54	17,09
RS ₉₅ : RP ₅	MR	387,63	0,24					97,39	15,58
	MH	469,76				0,97	3,76	99,00	10,53
	MT	390,81		84,24	0,29			97,92	14,54
	MG	383,48		44,47	1,25			95,84	20,63

R_{aj}²: Coeficiente de determinación ajustado %, ES: Error estándar del estimado, y_{max}: rendimiento máximo de metano (L CH₄/kg SV), k (d⁻¹), Rm: velocidad máxima de producción de metano (L CH₄/kg SV d), Fase de retardo λ (d).

Los valores de y_{max} para los MH y MG son los que presentan un menor error y son los modelos que mejor predicen el comportamiento de los residuos y las mezclas.

La fase de retardo fue despreciable para el RS y las mezclas, no así para el RP con un valor promedio de 2 días. Este residuo tuvo un bajo contenido de nitrógeno amoniacal (0,07 g/kg), por debajo a concentraciones reportadas como inhibitorias (1,7 a 7 g/kg) [12]. Sin embargo, la baja biodegradabilidad de este tipo de residuo puede deberse a su contenido en grasas, proteínas, presencia de antibióticos y desinfectantes, los cuales pueden causar una inhibición temporal y más tiempo de adaptación de los microorganismos[13].

Rendimiento de metano del residuo del secado del arroz, residuo porcino y sus mezclas

El rendimiento de metano obtenido experimentalmente para el RS, RP y sus mezclas (RS₉₈:RP₂ y RS₉₅:RP₅), y el esperado de acuerdo al rendimiento de los sustratos por separado, y la proporción de sólidos volátiles de cada uno en la mezcla, es presentado en la tabla 4.

Tabla 4
Rendimiento de metano experimental y esperado y efecto de la mezcla

Mezcla*	yCH ₄ (LCH ₄ /kgSV)		% yCH ₄	Efecto de la mezcla
	Experimental	Esperado		
RS ₁₀₀ :RP ₀	332,63	332,63		
RS ₀ :RP ₁₀₀	488,87	488,87		
RS ₉₈ :RP ₂	325,05	335,75	-3,2	No hay efecto
RS ₉₅ :RP ₅	401,20	340,44	17,8	Efecto sinérgico

*En base al % de sólidos volátiles en la mezcla

Como se muestra solo se obtiene un efecto sinérgico para la mezcla con mayor proporción de RP, RS₉₅:RP₅, con un incremento en un 18 % respecto al valor esperado. Los efectos sinérgicos son atribuidos principalmente a un mejor balance en la relación C/N, pH/alcalinidad, macro y micronutrientes, materia orgánica biodegradable y materia seca.

En la figura 2 se representa el rendimiento acumulativo de metano experimental y el del modelo que mejor ajustó los datos en cada caso.

Como se observa el mayor y_{max} se obtuvo para el RP, seguido de la mezcla RS₉₅:RP₅, con valores de 505,97 y 383,48 L CH₄/kg SV, respectivamente. El y_{max} para el RS (320,56 L CH₄/kg SV) y la mezcla RS₉₈:RP₂ fue similar (324,37 L CH₄/kg SV) y no difieren significativamente, lo cual se debe a la baja proporción de RP utilizada en la mezcla (3,8:13,6, g RP:g RS).

El rendimiento de metano obtenido para el residuo porcino de 488,87 L CH₄/kg SV está en el límite superior del intervalo entre 290 y 484 L CH₄/kg SV, reportado en otros artículos [14,15, 4, 16]. El amplio intervalo del rendimiento de metano para este tipo de residuo, está dado por la variabilidad de su composición fisicoquímica, la cual está en función del tipo de alimentación [17,16] [16] obtuvo rendimientos de metano entre

428-484 L CH₄/kg SV, con valores superiores para dietas de animales con altos contenido en proteínas y/o fibras.

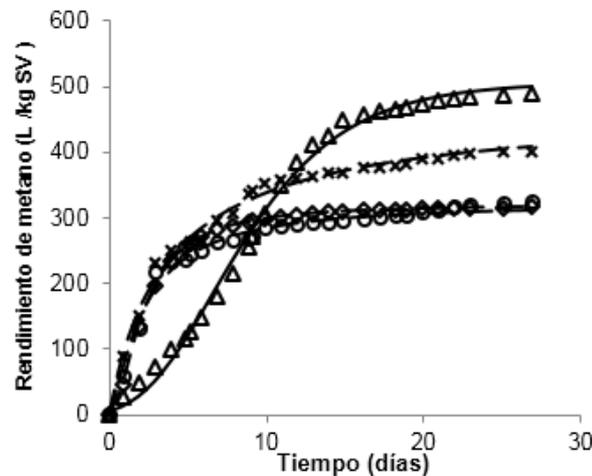


Fig.2- Rendimiento de metano acumulado experimental (rótulos) y el predicho por los modelos (líneas) para RS₁₀₀: RP₀ (◇), RS₀: RP₁₀₀ (Δ), RS₉₈: RP₂ (○), RS₉₅: RP₅ (x).

En cuanto al RS, se obtuvo un rendimiento de metano de 306,0 L CH₄/kgSV, el cual es ligeramente inferior al obtenido en este trabajo. Es importante destacar que las características físico químicas del RS son muy variables en función del período de cosecha, debido a la variabilidad en la distribución de las fracciones de paja, cáscara y granos de arroz presentes en el RS, lo cual va a determinar su biodegradabilidad. Específicamente el contenido de lignina del RS utilizado en este trabajo es ligeramente inferior al reportado por [2]. La lignina es un material altamente refractario a la degradación anaerobia, afectando también la biodegradabilidad de la celulosa, la hemicelulosa y de otros polímeros, convirtiéndose su degradación en el proceso limitante de la velocidad de la hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de sustratos lignocelulósicos como el RS.

Para las mezclas de RS₉₈:RP₂ y RS₉₅:RP₅ se obtuvieron rendimientos entre 325,05 L CH₄/kg SV y 401,20 L CH₄/kg SV, respectivamente. En el caso de la mezcla RS₉₅:RP₅ es 20,61 % superior al RS.

En cuanto a los parámetros cinéticos del proceso, se obtuvieron valores significativamente superiores de k para el RS y la mezcla con menor proporción de RP (RS₉₈:RP₂). El valor estimado por el MR para el RS fue de 0,32 d⁻¹. Este valor es superior al que obtuvo ⁽²⁾ de 0,179 d⁻¹.

La fase de retardo para el RP fue de 2 días. Una fase de retardo y disminución de la velocidad de producción de metano se reportan como los principales efectos causados por la presencia de compuestos inhibitorios como los fenólicos y furanos, así como por la acumulación temporal de Ácidos Grasos Volátiles (AGV). Esta fase de retardo está en el intervalo encontrado en la literatura [7]. Otros autores reportaron fases de retardos superiores de 6 días y 29,5 días [14,4] calculado a partir del MG. Según [16] el alto contenido en proteínas en la dieta animal retardó la producción de metano, mientras que para residuos con altos contenidos en fibra la producción de metano se inició más rápido. Esto se debe a que la tasa de hidrólisis de las proteínas del tipo fibroso ($0,02 \text{ d}^{-1}$) es menor que la de los carbohidratos.

La velocidad máxima de producción de metano R_m decreció con el incremento del contenido de RP en la mezcla. Se obtuvieron valores significativamente superiores de R_m para el RS y la mezcla con menor proporción de RP ($RS_{98}:RP_2$), con valores de 105,98 y 96,38 L CH_4/kg SV d, respectivamente, seguido por la mezcla $RS_{95}:RP_5$ con 84,24 L CH_4/kg SV d. El valor más bajo lo tuvo el RP con 40,98 L CH_4/kg SV d. En la literatura se reportan valores diferentes a los obtenidos, como [4] que obtuvo un valor superior de R_m para el RP 210 L CH_4/kg SV d, pero como se explicó anteriormente las características físico-químicas del residuo porcino son muy variables y van a definir tanto el rendimiento de metano como la cinética del proceso.

Conclusiones

- 1. El estudio cinético mostró un mejor ajuste para el modelo de Roediger en el caso del RS y sus mezclas, mientras que para el RP, ajustó mejor al modelo modificado de Gompertz.***
- 2. De los sustratos evaluados el residuo porcino tiene mayor rendimiento de metano que el residuo del secado del arroz, con un valor de 488,87 L CH_4/kg SV.***
- 3. La codigestión del residuo del secado del arroz (RS) y el residuo porcino (RP) tuvo un efecto sinérgico para la mezcla $RS_{95}:RP_5$, con***

un incremento en un 18 % del rendimiento de metano respecto al valor esperado por la contribución individual en la mezcla.

4. La cinética del proceso de digestión anaerobia se afectó por la inclusión del residuo porcino en la mezcla.

Referencias bibliográficas

1. LINARES MOREL, O. y MENÉSES GÓMEZ, C. Comunicación personal con el Director y subdirector de Industria: Complejo Agroindustrial Arrocerero CAI "Sur del Jíbaro". Sancti Spíritus, Noviembre 2018.
2. CONTRERAS, L. M. *Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocerera cubana para la producción de biogás*. Tesis doctoral inédita. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Villa Clara, 2013.
3. SYAFRUDIN, NUGRAHA, W. D., *et al.* The effect of enzymatic pretreatment and c/n ratio to biogas production from rice husk waste during solid state anaerobic digestion (SS-AD). En: *MATEC Web of Conferences 101*, 2017.
4. XIE, S., FROST, J. P., *et al.* Effects of thermo-chemical pre-treatment of grass silage on methane production by anaerobic digestion. *Bioresour Technol.* 2011, 102 (19), pp. 8748-8755.
5. MATA-ALVAREZ, J., DOSTA, J., *et al.* Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling. *Critical Reviews in Biotechnology.* 2011, 31 (2), pp. 99-11.
6. LOPES, M., BAPTISTA, P., *et al.* Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of pig slurry and horse manure with mechanical pre-treatment. *Environmental Technology.* 2017, pp. 1-9.
7. MAO, C., ZHANG, T., *et al.* Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. *Scientific Reports.* 2017, 7 (1), pp. 1-9.
8. APHA, AWWA, *et al.* Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC, USA, American Public Health

- Association/America Water Works Association/Water Environment Federation, 1995, pp. 541.
9. VAN SOEST, P., ROBERTSON, J., *et al.* Symposium: carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 1991, 74 pp. 3583–3597.
10. VDI-4630. Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche (*Fermentation of organic materials Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*) VDI-Handbuch Energietechnik, Germany, 2006, pp. 92.
11. DONOSO-BRAVO, A., PEREZ-ELVIRA, S. I., *et al.* Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes. *Chem Eng J.* 2010, 160 (2), pp. 607-614.
12. CHEN, Y., CHENG, J. J., *et al.* Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour Technol.* 2008, 99 (10), pp. 4044-4064.
13. PEREDA REYES, I., PAGÉS DÍAZ, J., *et al.* Anaerobic Biodegradation of Solid Substrates from Agroindustrial Activities — Slaughterhouse Wastes and Agrowastes. En: *Biodegradation and Bioremediation of Polluted Systems - New Advances and Technologies*. In Tech., 2015, pp. 32-64.
14. HIMANSHUA, H., MURPHY, J. D., *et al.* Antagonistic effects on biogas and methane output when co-digesting cattle and pig slurries with grass silage in in vitro batch anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy.* 2018, 109 pp. 190-198.
15. LI, K., LIU, R., *et al.* Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations. *Bioresource Technology.* 2015, 198 pp. 133-140.
16. JARRET, G., MARTINEZ, J., *et al.* Pig feeding strategy coupled with effluent management - fresh or stored slurry, solid phase separation - on methane potential and methane conversion factors during storage. *Atmos Environ.* 2011, 45 (34), pp. 6204-6209.

- 17.MOLLER, H. B., SOMMER, S. G., *et al.* Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass Bioenerg.* 2004, 26 (5), pp. 485-495.