

**Artículo Original**

**CINÉTICA DE LA PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DEL  
RESIDUO DEL SECADO DE ARROZ CON ESTIÉRCOL  
VACUNO Y PORCINO**

**METHANE PRODUCTION KINETICS FROM RICE DRIED RESIDUE WITH  
PIG AND COW MANURE**

Lisbet Mailin López González <sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

Mildre Zayas González <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8034-9621>

Fabiany de Jesús Morgado León <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6394-869X>

Julio Pedraza Garciga <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1780-5297>

<sup>1</sup> Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI). Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez", Ave. de los Mártires N° 360. CP 60100. Sancti Spiritus, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Procesos Agroindustriales, Facultad de Agronomía, Universidad de Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez". CP 65100. Ciego de Ávila, Cuba.

Recibido: Octubre 27, 2021; Revisado: Noviembre 15, 2021; Aceptado: Noviembre 24, 2021

**RESUMEN**

**Introducción:**

La digestión anaerobia es un proceso atractivo para una empresa agroindustrial de granos donde se producen varios residuos. Existen estudios que demuestran las ventajas de la codigestión de la paja de arroz y del residuo del secado del arroz con estiércol porcino, sin embargo el efecto de la cinética del proceso en la mezcla del residuo del secado del arroz con estiércol vacuno y porcino no se ha investigado.

**Objetivo:**

Evaluar la cinética de la producción de metano a partir de diferentes mezclas del residuo de secado del arroz con estiércol vacuno y porcino en sistema discontinuo.

**Materiales y Métodos:**

Se realizó un experimento en sistema discontinuo a temperatura mesofílica ( $37 \pm 2$  °C) para cuatro mezclas, seleccionadas de acuerdo a un Diseño de mezcla de vértices extremos. Para la descripción del comportamiento cinético del proceso de digestión anaerobia, se ajustaron los datos experimentales a cuatro modelos de primero y segundo orden.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Lisbet M. López, Email: [lisbet@uniss.edu.cu](mailto:lisbet@uniss.edu.cu)



### **Resultados y Discusión:**

Los modelos explicaron entre 98,54-99,90 % la variabilidad del rendimiento de metano acumulado obtenido experimentalmente. El mejor rendimiento de metano (351,19 L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg Sólidos Volátiles) fue para la mezcla con el mayor porcentaje de residuo del secado de arroz.

### **Conclusiones:**

El estudio demuestra las potencialidades para la producción de biogás de los residuos existentes en una empresa agro-industrial de granos. Sin embargo, la decisión de la tecnología a utilizar debe basarse en reactores con agitación, lo cual debe ser previamente evaluado en experimentos a régimen semicontinuo.

**Palabras clave:** biogás; codigestión anaerobia; estiércol porcino; estiércol vacuno; residuo del secado del arroz.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

The anaerobic digestion is an attractive process for a grains agro-industrial enterprise where several residues are produced. Different studies show the advantages of rice straw and rice dried residue with pig manure codigestion, however the effect of the mixture rice dried residue with pig and cow manure on anaerobic digestion kinetic have not been studied.

### **Objective:**

To evaluate the methane production kinetic from different mixtures of rice dried residue with cow and pig manure in discontinuous system.

### **Materials and Methods:**

The anaerobic digestion process was evaluated in discontinuous system at mesophilic conditions (35 ± 2 °C) for four mixtures, selected according to a Mixture design of extreme vertices. Four models of first and second order were used for the kinetic performance of the anaerobic digestion process description.

### **Results and Discussion:**

The models explained between 98.54 until 99.90% the variability of obtained experimentally methane yield. The best methane yield (351.19 L/kg volatile solids) was obtained for the mixture with maximum percentage of rice dried residue.

### **Conclusions:**

This study shows the potentialities of biogas production from residues generated in a grains agro-industrial enterprise. However, technology selection must be based in reactors with agitation, which must be evaluated in semicontinuous regime.

**Keywords:** biogas; anaerobic codigestion; pork manure; cow manure; rice drying residue.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En Cuba se genera una elevada cantidad de residuos agroindustriales, los cuales son una fuente de sustrato potencial para la producción de biogás. Entre ellos el residuo de

secado del arroz (RS), constituido por paja de arroz, cáscara de arroz y granos de arroz fraccionados, se destaca por su volumen de generación (0,04 t/t de arroz húmedo) y disponibilidad en la industria arrocera, cuyo destino es ser depositado en grandes montones, los cuales se encuentran cercanos al secadero, constituyendo en muchas ocasiones fuente de contaminación ambiental (Contreras, 2013).

En la revisión realizada de la literatura se encontraron pocos artículos que reporten el estudio del RS para la producción de biogás (Contreras et al., 2012; Díaz et al., 2016; López y Heiermann, 2021). Rendimientos de metano similares de 164 y 169 L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg Sólidos Volátiles (SV) durante la monodigestión del RS obtuvieron Contreras et al., (2012) y López y Heiermann, (2021) en un sistema discontinuo a régimen mesofílico.

La digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocera, principalmente la paja de arroz y el residuo del secado de arroz tienen una atención especial debido a su elevado contenido en materia orgánica (Contreras et al., 2012). Sin embargo, su alta relación Carbono/Nitrógeno (C/N) y contenido de lignina, así como su compleja, estable y recalcitrante (difícil de degradar por los microorganismos) estructura lignocelulósica, son consideradas limitantes cuando estos residuos son digeridos como único sustrato (Ngan et al., 2020). De ahí que un mejor balance de nutrientes y alternativas de pretratamiento son estrategias a tener en cuenta para mejorar el proceso de digestión anaerobia para este tipo de residuos.

Existen varios tipos de pretratamientos de materiales lignocelulósicos: físicos (mecánico e irradiación), químicos (álcalis, ácidos, oxidantes y organosolventes), físico-químicos (extrusión, hidrotérmico y explosión de vapor) y biológicos (microorganismos y enzimáticos) (Abraham et al., 2020). Su eficiencia varía según la biomasa y tipo de pretratamiento, por lo que la selección y las condiciones a utilizar deben ser probadas para cada biomasa. Recientemente (López y Heiermann, 2021) obtuvieron un incremento de un 63 % en el rendimiento de metano en comparación a la biomasa sin pretratar.

La codigestión ha sido aplicada con resultados positivos en la mezcla de la paja de arroz y cáscara de arroz con residuos de comida (compuesto por 35 % de raíces vegetales, 20 % arroz, 8 % harina, 6 % carnes, y 31 % de otros) (Zhan-Jiang et al., 2014; Jabeen et al., 2015), excreta porcina (Mei et al., 2016; López-González et al., 2019), excreta vacuna (Wang et al., 2014; Haryanto et al., 2018), *hydrilla verticillata* (Kainthola et al., 2019) y con gallinaza y excreta porcina (Shen et al., 2018). Recientemente López-González et al., (2019) reportaron el efecto positivo de la codigestión del RS con estiércol porcino (RP), al lograrse un incremento del rendimiento de metano en un 18 %, respecto al valor esperado por la contribución individual en la mezcla.

La codigestión anaerobia proporciona beneficios como estabilización del proceso, pH y capacidad de amortiguación, incorporación de macro y micronutrientes en falta, reduce la concentración de compuestos inhibidores o tóxicos (ácidos grasos volátiles/amoníaco), logrando una mejor sinergia, a través de la mezcla de diversos sustratos, y actividad microbiana, con lo cual se mejora el rendimiento de metano en el proceso (Prajapati et al., 2018).

La mezcla del RS con RP y estiércol vacuno (RV) no ha sido reportada en la literatura, sin embargo esta se presenta como una alternativa atractiva para su implementación en empresas agroindustriales de granos, al tener disponibilidad de ganadería vacuna y

porcina cercana a la planta de secado del arroz, lo cual posibilita el uso de la codigestión del RS con estos residuos. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar la cinética de la producción de metano a partir de diferentes mezclas del residuo del secado de arroz con estiércol vacuno y porcino en sistema discontinuo.

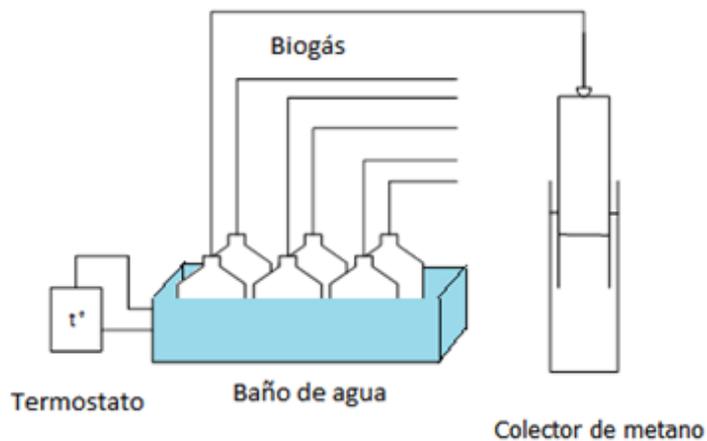
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La biomasa utilizada como fuente de inóculo en el ensayo de digestión anaeróbica fue una mezcla de lodo anaerobio procedente de un biodigestor chino con residuo porcino como sustrato y el efluente de un reactor de mezcla con 50 L de capacidad, el cual estaba siendo alimentado con residuo de secadero. El inóculo fue tamizado a 2 mm y mantenido en condiciones anaerobias por una semana para asegurar el agotamiento de la materia orgánica contenida.

El RS fue suministrado por la empresa agroindustrial de granos, perteneciente al municipio La Sierpe, Sancti Spíritus, Cuba. Los RP y RV fueron recolectados en granjas de la cooperativa “Hornos de cal”, Sancti Spíritus, Cuba. Al RS se le aplicó un pretratamiento físico (molido a 3 mm) para facilitar su homogenización.

Los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), cenizas, pH y nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), se determinaron de acuerdo a las normas establecidas por los métodos estandarizados (APHA, AWWA, WEF., 1995). La hemicelulosa, celulosa y lignina fueron cuantificadas de acuerdo al método de Van Soest (Van et al., 1991).

La experimentación a escala de laboratorio se realizó en reactores de polietileno de 2 litros de capacidad, a temperatura constante de  $37 \pm 2$  °C, controlada por un baño de agua con termostato. Los reactores fueron cerrados con tapón de goma y conectados, mediante una manguera, a colectores para la salida del biogás. En la Figura 1 se muestra la configuración del set experimental utilizado.



**Figura 1.** Esquema de la instalación experimental para ensayos en discontinuo

El líquido desplazado en los colectores consistió en una solución saturada de NaOH al 3%, para facilitar la disolución de  $\text{CO}_2$  en agua, contabilizándose el metano obtenido mediante el desplazamiento del líquido (VDI-4630, 2006). A cada reactor se le adicionó 900 g de inóculo y una cantidad determinada de sustrato para mantener una relación inóculo/sustrato de 1 (g SV/ g SV), recomendada en el caso de digestión en discontinuo a altas cargas de sólidos (VDI-4630, 2006). Las características físico-químicas del

inóculo fueron: 3,41 ST%MF, 1,58 SV%MF y pH: 8,6. Los ensayos se realizaron en triplicado. Todos los reactores fueron agitados manualmente una vez al día. El ensayo anaerobio se realizó por 25 días, cuando la producción de metano fue inferior en un 1 % a la acumulada (VDI-4630, 2006).

El rendimiento de metano  $P_{CH_4}$  ( $L_N CH_4/kg SV$ ) se calculó como la cantidad de metano acumulada durante el tiempo de digestión ( $V_{CH_4}$ ) por la masa de sustrato alimentada en término de sólidos volátiles ( $M_{SV}$ ) (Ecuación 1), y se corrigió a condiciones estándar de temperatura (273 K) y presión (101,3 kPa).

$$P_{CH_4} = \frac{\sum_{t=0}^{t=25} V_{CH_4}}{M_{SV}} \quad (1)$$

Se empleó un diseño de vértice extremo, de acuerdo a la disponibilidad de residuos en la Empresa “Sur del Jíbaro”. Como restricciones para el diseño, se utilizaron valores de 86-92%, 6-12% y 2-4% (en base al porciento de SV de cada componente en la mezcla) para el RS, RV y RP, respectivamente. Estas restricciones constituyen el intervalo de experimentación para cada componente de la mezcla. La cantidad a adicionar de cada sustrato en la mezcla se calculó por la Ecuación 2.

$$MF_{\text{sustrato}} = \frac{M_{SV} \cdot P_{SV}}{SV_{\text{sustrato}}} \quad (2)$$

Donde  $P_{SV}$  es el porciento de SV del sustrato en la mezcla definidos por la Matriz de diseño experimental (Tabla 1), y  $SV_{\text{sustrato}}$  es el % de SV contenidos en el sustrato, determinado en los análisis químicos.

**Tabla 1.** Matriz de diseño experimental

<i>Mezcla</i>	<i>RS</i>	<i>RV</i>	<i>RP</i>
RS <sub>92</sub> :RV <sub>6</sub> :RP <sub>2</sub>	92	6	2
RS <sub>86</sub> :RV <sub>12</sub> :RP <sub>2</sub>	86	12	2
RS <sub>90</sub> :RV <sub>6</sub> :RP <sub>4</sub>	90	6	4
RS <sub>86</sub> :RV <sub>10</sub> :RP <sub>4</sub>	86	10	4

Para el procesamiento estadístico de los parámetros evaluados se empleó el paquete estadístico *Statgraphics Centurión XV*. Se empleó el análisis de varianza de clasificación simple y para comparar las medias se utilizó la prueba de intervalos múltiples de Duncan. La significancia de los modelos se evaluó con un nivel de significación del 5% (p-valor  $\leq 0,05$ ).

El comportamiento cinético fue descrito a través de tres modelos de reacciones de primer orden (Ecuaciones 3-5), y el modelo modificado de Hill (Ecuación 6). Estos modelos son los más frecuentemente usados para analizar el comportamiento de la producción acumulada de metano  $P$  ( $L_N CH_4/kg SV$ ) en un tiempo dado  $t$  (d), y permitieron un ajuste adecuado para sustratos similares a los estudiados en la presente investigación (López-González et al., 2019; López y Heiermann, 2021).

Modelo de Roediger:

$$P = P_m * [1 - \exp(-kt)] \quad (3)$$

Modelo de Gompertz modificado:

$$P = P_m \exp \left[ - \exp \left( \frac{R_m e}{P_m} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (4)$$

Modelo de Función Transferencial:

$$P = P_m \left[ 1 - \exp\left(\frac{-R_m(t - \lambda)}{P_m}\right) \right] \quad (5)$$

Modelo modificado de Hill:

$$P = P_m \frac{t^b}{(c^b + t^b)} \quad (6)$$

A partir del ajuste de los datos experimentales a los modelos, los parámetros cinéticos obtenidos son: el valor del máximo rendimiento de metano  $P_m$  ( $L_N \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ ), la constante cinética de velocidad aparente  $k$  ( $d^{-1}$ ), la duración del desfase inicial en la producción de metano  $\lambda$  (d), la máxima producción específica de metano  $R_m$  ( $L_N \text{ CH}_4/\text{kg SV d}$ ), el tiempo al cual la mitad del rendimiento de metano es alcanzado  $c$  (d) y  $b$  un parámetro para ajuste del modelo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de los sustratos

La Tabla 2 presenta los parámetros analizados al RS, RP y RV. El RS tuvo un contenido de materia orgánica, expresado en términos de SV, de 77 % Materia fresca (MF), superior a valores reportados previamente (Contreras et al., 2012; López y Heiermann, 2021), y al obtenido para el RP y RV con 7% MF y 10% MF, respectivamente.

**Tabla 2.** Caracterización de los sustratos utilizados en el ensayo anaerobio

<i>Parámetros</i>	<i>Unidades</i>	<i>RS</i>	<i>RV</i>	<i>RP</i>
pH	-	6,07	7,57	7,85
ST	% MF	83,12	12,36	9,27
SV	% ST	92,83	84,47	77,99
Cenizas	% ST	7,17	15,53	22,31
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	g/kg	0,071	0,255	1,714
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

Sin embargo, el alto contenido de fibra detergente neutra 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. El contenido de lignina y de fibra detergente ácida (celulosa+lignina) es inferior al reportado por Contreras et al., (2012), lo cual se debe a la variabilidad en la composición de este residuo entre cosecha y durante el procesamiento del arroz.

#### 3.2. Comportamiento cinético de la Digestión anaerobia

En la Tabla 3 se detallan los parámetros cinéticos 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 puede observar todos los modelos se adecuaron a los datos experimentales del rendimiento de metano acumulativo con un

valor de  $R^2_{aj}$  superior al 98,54 %. Por tanto, los modelos obtenidos explican entre un 98,54 y 99,70 % la variabilidad de los datos.

El error estándar de estimación estuvo entre 4,92 y 10,76, con valores superiores para el modelo de Gompertz modificado.

Para todas las mezclas los valores de Pm para MR, MH y MT son los que presentan un menor error y son los modelos que mejor predicen el comportamiento de estos residuos.

**Tabla 3.** Matriz de diseño experimental

<i>Mezcla</i>	<i>P<sub>CH4</sub></i>	<i>Modelo</i>	<i>P<sub>m</sub></i>	<i>k</i>	<i>R<sub>m</sub></i>	<i>λ</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></i>	<i>ES</i>
RS92:RV6:RP2	348,17	MR	344,64	0,25	-	-	-	-	99,1	11,6
		MH	350,35	-	-	-	1,79	2,80	99,9	2,8
		MT	343,73	-	92,81	0,18	-	-	99,3	8,4
		MG	338,59	-	60,31	0,15	-	-	98,9	10,1
RS86:RV12:RP2	306,91	MR	300,43	0,24	-	-	-	-	99,2	8,2
		MH	309,11	-	-	-	1,63	2,94	99,8	3,6
		MT	299,68	-	75,29	0,15	-	-	99,2	7,7
		MG	294,73	-	47,95	0,06	-	-	98,4	11,4
RS90:RV6:RP4	309,18	MR	302,84	0,25	-	-	-	-	98,9	9,2
		MH	308,77	-	-	-	1,75	2,84	99,8	3,8
		MT	302,06	-	80,39	0,19	-	-	99,1	8,4
		MG	297,26	-	52,52	0,14	-	-	98,6	10,4
RS86:RV10:RP4	279,16	MR	276,41	0,27	-	-	-	-	99,0	8,0
		MH	280,12	-	-	-	1,85	2,58	99,9	2,5
		MT	275,78	-	80,51	0,18	-	-	99,2	7,2
		MG	271,95	-	52,83	0,16	-	-	98,9	8,2

$R_{aj}^2$ : Coeficiente de determinación ajustado %, ES: Error estándar del estimado, P: rendimiento de metano experimental ( $L_N CH_4/kg SV$ ), Pm: rendimiento máximo de metano ( $L_N CH_4/kg SV$ ), k ( $d^{-1}$ ), Rm: velocidad máxima de producción de metano ( $L_N CH_4/kg SV d$ ), Fase de retardo  $\lambda$  (d).

En la tabla 3 se puede apreciar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las mezclas (RS92:RV6:RP2-RS86:RV10:RP4), (RS92:RV6:RP2-RS86:RV12:RP2), (RS90:RV6:RP4-RS86:RV10:RP4) y una semejanza entre las mezclas (RS92:RV6:RP2-RS90:RV6:RP4), (RS86:RV12:RP2-RS90:RV6:RP4) y (RS86:RV12:RP2-RS86:RV10:RP4) para el modelo de Hill, mientras que para los tres modelos restantes no hubo diferencias significativas. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a cero.

El modelo de Hill tuvo un mejor ajuste a las curvas experimentales obtenidas para las mezclas RS92:RV6:RP2, RS90:RV6:RP4 y RS86:RV10:RP4 por la tendencia de estas al crecimiento para  $t > 20$  días, ya que al tener mayor proporción de residuo de secadero la etapa de hidrólisis es más lenta. Sin embargo, para la mezcla RS86:RV12:RP2 se puede observar una tendencia de la curva a alcanzar la meseta más rápido, ya que esta es la de menor proporción de residuo de secado y mayor proporción de residuo vacuno

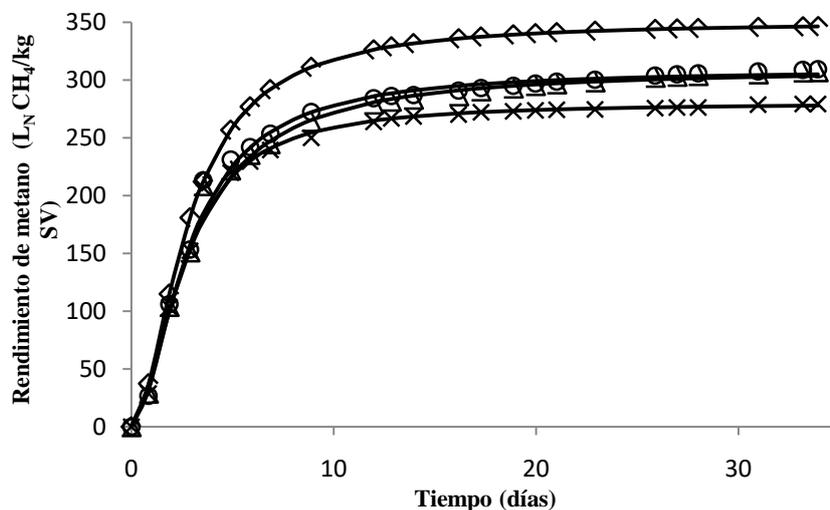
lo que debió favorecer la hidrólisis del RS. El RV contiene bacterias celulolíticas que rompen celulosa, el cual es un material difícil de degradar.

En cuanto al Rm, estimado por dos modelos, el MT y MG, los valores para el MT fueron superiores hasta en un 45 % respecto al MG. El MT obtuvo un valor de  $R^2_{aj}$  superior por lo que se puede estimar mejor el valor de Rm para el RS y las mezclas. El mejor valor (60,31  $L_N CH_4/kg SV d$ ) se obtuvo para la mezcla RS92:RV6:RP2 lo cual evidencia el efecto sinérgico de la mezcla atribuido a un mejor balance de nutrientes y a una mayor versatilidad de la comunidad microbiana.

La fase de retardo fue despreciable para el RS y las mezclas, con un valor menor a un día. Los valores estimados de  $\lambda$  por MT y MG difieren y resulta difícil llegar a una comparación clara entre su comportamiento, de acuerdo a las mezclas estudiadas.

### 3.3. Rendimiento de metano para las mezclas estudiadas

En la Figura 2 se representa el rendimiento de metano obtenido experimentalmente y las curvas ajustadas por el modelo modificado de Hill para las cuatro mezclas estudiadas.



**Figura 2.** Rendimiento acumulado de metano experimental, (rótulos) para RS<sub>92</sub>:RV<sub>6</sub>:RP<sub>2</sub> (◇), RS<sub>86</sub>:RV<sub>12</sub>:RP<sub>2</sub> (Δ), RS<sub>90</sub>:RV<sub>6</sub>:RP<sub>4</sub> (o), RS<sub>86</sub>:RV<sub>10</sub>:RP<sub>4</sub> (x) y su ajuste de acuerdo al modelo modificado de Hill (líneas)

Como se puede observar el mayor Pm se obtuvo para la mezcla RS92:RV6:RP2, seguido de la mezcla RS90:RV6:RP4, RS86:RV12:RP2 y RS86:RV10:RP4, con valores de 351,19  $L_N CH_4/kg SV$ , 334,19  $L_N CH_4/kg SV$ , 299,88  $L_N CH_4/kg SV$  y 269,52  $L_N CH_4/kg SV$ , respectivamente.

Los valores de Pm obtenidos por los modelos fueron superiores al P, con la excepción del modelo modificado de Gompertz, donde la tendencia de la curva es más aplanada al final.

El Pm fue significativamente superior para las mezclas RS92:RV6:RP2 y RS90:RV6:RP4, con una mayor proporción de RS (Tabla 3). El incremento de Pm para la mezcla RS92:RV6:RP2, de acuerdo a los valores estimados para los cuatro modelos, estuvo entre 10-17% y 17-30% respecto a las mezclas RS86:RV12:RP2 y RS86:RV10:RP4, respectivamente. Este incremento para la mezcla RS90:RV6:RP4 fue entre 11-14% y 16-24%, en comparación con las mezclas RS86:RV12:RP2 y RS86:RV10:RP4, respectivamente. La adición de RV a la digestión anaerobia del RS

permitió la mejora de la dinámica microbiana al introducir bacterias hidrolíticas del tipo celulítico lo cual favoreció la fase de hidrólisis. En la literatura, no se encontraron investigaciones en las que se abordara el estudio del RS en codigestión con RV y RP. Solo se encontró un estudio sobre la codigestión del RS y RP (López-González et al., 2019). En este se determinó el rendimiento de metano de los sustratos en monodigestión y para las mezclas RS98:RP2 y RS95:RP2 (en base al % de sólidos volátiles en la mezcla). El máximo rendimiento de metano (401,20 L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg SV) y efecto sinérgico de la codigestión (18% respecto al valor esperado), se obtuvo para la mezcla RS95:RP2, superior en 20,61% respecto a la monodigestión del RS.

Reportes de la codigestión de paja de arroz y cáscara de arroz con otros residuos, como residuos porcinos, vacunos, y de cocina, mostraron un efecto positivo en el rendimiento de metano (Kainthola et al., 2019; Kainthola et al., 2020). En la codigestión de la paja de arroz con residuos de alimentos para diferentes relaciones C/N de 25, 30, y 35 se obtuvo similar rendimiento de metano de 294,17 L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg SV, con un incremento de un 71% en comparación a la monodigestión de la paja de arroz (Kainthola et al., 2020). Un resultado diferente obtuvo el mismo autor durante la codigestión de la paja de arroz y la *hydrilla verticillata* (sustrato rico en nitrógeno). En este caso diferentes relaciones C/N revelaron diferencias en la estabilidad del proceso y el rendimiento de metano. El valor máximo se obtuvo para la mezcla de paja de arroz y la *hydrilla verticillata* con una relación de C/N de 25, con un incremento del 40% respecto a la paja de arroz sola (Kainthola et al., 2019). La DA de la cáscara de arroz en mono y codigestión ha sido reportada por varios autores (Haider et al., 2015; Syafrudin et al., 2016; Sunwanee et al., 2019). En otro trabajo se estudiaron cuatro relaciones de mezcla de residuos de alimentos con cáscara de arroz. Como resultado se obtuvo que la producción de biogás decreció a medida que lo hizo la proporción de residuos de alimentos en la mezcla, demostrando la baja biodegradabilidad de la cáscara de arroz (Haider et al., 2015).

La producción de biogás a partir de aguas residuales del arroz Thai con cáscara de arroz y tres tipos de excretas animales (gallinaza, excreta vacuna y excreta de codorniz), con y sin ceniza fue investigada por Sunwanee et al., (2019). Cada digester se alimentó con 10 g de cáscara de arroz, 10 g de excreta animal y 200 mL de aguas residuales. El máximo rendimiento de metano (311,2 L<sub>N</sub> CH<sub>4</sub>/kg SV eliminados) fue para la mezcla de aguas residuales con gallinaza y ceniza. Este resultado demuestra la necesidad de macronutrientes (N específicamente) y micronutrientes que se requieren para una eficiente DA de la cáscara de arroz, el cual es el componente principal del RS.

Los efectos sinérgicos son atribuidos principalmente a un mejor balance en la relación C/N, macro y micronutrientes, materia orgánica biodegradable y materia seca (Mata-Alvarez et al., 2011). Por tanto, durante el diseño de plantas de biogás para tratar los residuos que se generan en empresas agro-industriales se le debe dar una importancia significativa a la incorporación de co-sustratos en la alimentación, que permitan mejorar el balance de macro y micronutrientes en el proceso de DA. La decisión de la tecnología a utilizar debe basarse en reactores con agitación ya sea del tipo horizontal (digestión seca) o vertical (digestión húmeda), lo cual debe ser previamente evaluado en experimentos a régimen semicontinuo. La reconversión tecnológica de mezcladores existentes en la empresa puede ser opción para la reducción de costos.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. El rendimiento de metano acumulado obtenido experimentalmente ajustó bien a los cuatro modelos utilizados con un valor de  $R^2_{aj}$  superior al 98,54%.
2. El mejor rendimiento de metano en sistema discontinuo se obtuvo para la mezcla RS92:RV6:RP2 (351,19  $L_N$   $CH_4/kg$  SV), pero sin diferencias significativas con la mezcla RS90:RV6:RP4 ( $L_N$   $CH_4/kg$  SV).
3. Investigaciones futuras deben dirigirse a la evaluación en sistema semicontinuo de la digestión anaerobia del residuo del secado del arroz utilizando reactores con agitación, codigestión con estiércol vacuno y porcino y la incorporación de una fase de pretratamiento para incrementar su biodisponibilidad.

#### **REFERENCIAS**

- Abraham, A., Mathew, A.K., Park, H., Choi, O., Sindhu, R., Parameswaran, B., Pandey, A., Park, J.H., & Sang, B.-I., Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass., *Bioresource Technology*, Vol. 301, 2020, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>
- APHA, AWWA, WEF., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.*, 21th Edition ed, American Public Health Association/America Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA, 2005, pp. 2.55-4.111.
- Contreras, L.M., *Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocera cubana para la producción de biogás.*, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2013. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6613>
- Contreras, L.M., Schelle, H., Sebrango, C.R., & Pereda, I., Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process., *Water Sci Technol*, Vol. 65, No. 6, 2012, pp. 1142-1149. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>
- Díaz, J.A., Miranda, A., y Almirall, E.J., Metodología para obtención de biogás a partir de residuos de cosechas del arroz utilizando como inóculo aguas residuales., *Avances*, Vol. 18, No. 4, 2016, pp. 325-333. <http://www.cigest.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/181>
- Haider, M.R., Zeshan, Yousaf, S., Malik, R.N., & Visvanathan, C., Effect of mixing ratio of food waste and rice husk co-digestion and substrate to inoculum ratio on biogas production., *Bioresour Technol*, Vol. 190, 2015, pp. 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.105>
- Haryanto, A., Sugara, B.P., Telaumbanua, M., & Rosadi, R.A.B., Anaerobic Co-digestion of Cow Dung and Rice Straw to Produce Biogas using Semi-Continuous Flow Digester: Effect of Urea Addition., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 147, 2018, pp. 1-11. <http://10.1088/1755-1315/147/1/012032>
- Jabeen, M., Zeshan, S., Haider, M.R., & Malik, R.N., High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates., *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 2015, pp. 149-153.

- <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.023>
- Kainthola, J., Kalamdhad, A.S., & Goud, V.V., Enhanced methane production from anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla verticillata and its kinetic analysis., *Biomass and Bioenergy*, Vol. 125, 2019, pp. 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.011>
- Kainthola, J., Kalamdhad, A.S., & Goud, V.V., Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic co-digestion of rice straw and food waste., *Renewable Energy*, Vol. 149, 2020, pp. 1352-1359. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.124>
- López-González, L.M., Ruiz-Manso, J.M., Contreras-Velásquez, L.M., Garciga, J.P., Hermida-García, O., Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo. *Revista Tecnología Química*, Vol. 39, No. 2, 2019, pp. 286-300. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2019.2%25x>
- López, L.M., & Heiermann, M., Effect of Liquid Hot Water Pretreatment on Hydrolysates Composition and Methane Yield of Rice Processing Residue., *Energies*, Vol. 14, No. 11, 2021, pp. 1-14. <https://doi.org/10.3390/en14113254>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Macé, S., & Astals, S., Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling., *Critical Reviews in Biotechnology*, Vol. 31, No. 2, 2011, pp. 99-11.
- Mei, Z., Liu, X., Huang, X., Li, D., Yan, Z., Yuan, Y., & Huang, Y., Anaerobic Mesophilic Codigestion of Rice Straw and Chicken Manure: Effects of Organic Loading Rate on Process Stability and Performance., *Applied biochemistry and biotechnology*, Vol. 179, 2016, pp. 846–862. <http://doi.org/10.1007/s12010-016-2035-6>
- Ngan, N.V.C., Chan, F.M.S., Nam, T.S., Van Thao, H., Maguyon-Detras, M.C., Hung, D.V., Cuong, D.M., & Van Hung, N., Anaerobic Digestion of Rice Straw for Biogas Production., in: *Sustainable Rice Straw Management*, Springer International Publishing, Cham, 2020, pp. 65-92. [http://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8\\_5](http://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_5)
- Prajapati, K.K., Pareek, N., & Vivekanand, V., Pretreatment and Multi-Feed Anaerobic Co-digestion of Agro-Industrial Residual Biomass for Improved Biomethanation and Kinetic Analysis., *Frontiers in Energy Research*, Vol. 6, No. 111, 2018, pp. 1-18. <http://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00111>
- Shen, F., Li, H., Wu, X., Wang, Y., & Zhang, Q., Effect of organic loading rate on anaerobic co-digestion of rice straw and pig manure with or without biological pretreatment., *Bioresour Technol*, Vol. 250, 2018, pp. 155-162. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.037>
- Sunwanee, J., Saina, M., Laddawan, N., & Chairat, S., Kinetic model of biogas production from co-digestion of Thai rice noodle wastewater with rice husk and different type of manure with ash supplement., in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, International Conference on Sustainable Energy and Green Technology, Vol. 463, Bangkok, Thailand, 2019, pp. 1-8. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012008>
- Syafrudin, S., Nugraha, W.D., Matin, H.H.A., & Budi, Y., The effect of enzymatic pretreatment and c/n ratio to biogas production from rice husk waste during solid state anaerobic digestion (SS-AD)., *MATEC Web of Conferences SICEST 2016*,

- South Sumatra, Indonesia, 8-10 Noviembre, pp. 1-5.  
<http://doi.org/10.1051/mateconf/201710102016>
- Van, P., Robertson, J., & Lewis, B., Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition., J. Dairy Sci., Vol. 74, 1991, pp. 3583–3597.
- VDI-4630, Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche (*Fementation of organic materials Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*)., VDI-Handbuch Energietechnik, Germany, 2006, pp. 1-92.
- Wang, X., Lu, X., Li, F., & Yang, G., Effects of Temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure., Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition, PLOS ONE, Vol. 9, No. 5, 2014, pp. 1-7. <http://10.1371/journal.pone.0097265>
- Zhan-Jiang, P., Jie, L., Feng-mei, S., Su, W., Ya-bing, G., & Da-lei, Z., High-solid Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Rice Straw for Biogas Production., Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), Vol. 21, No. 4, 2014, pp. 61-66. [https://doi.org/10.1016/S1006-8104\(15\)30021-0](https://doi.org/10.1016/S1006-8104(15)30021-0)

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Dra.C. Lisbet Mailin López González. Realizó el estudio, análisis y escritura del artículo.
- Ing. Mildre Zayas González. Realizó la caracterización de los sustratos.
- Ing. Fabiany de Jesús Morgado León. Realizó el experimento en discontinuo.
- Dr.C. Julio Pedraza Garciga. Colaboró con la revisión del artículo.