

# Codigestión anaeróbica psicrófila de desechos de alimentos y heces de perro en un biodigestor casero: producción de biogás y eficiencia térmica

Artículo largo



Edwin Alfonso Zelaya-Benavidez<sup>1</sup> ; Eva Luz Hernández-Teyssier<sup>2</sup> ; Deneb Peredo-Mancilla<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Comunal de Oaxaca (UACO), CUC de San Andrés Solaga, Oaxaca, México.

<sup>2</sup>Universidad Interserrana del Estado de Puebla (UIEPA)- Ahuacatlán: Ahuacatlán, Puebla, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), La Paz, Baja California Sur, México.

\*dperedo@uabcs.mx

## Resumen

El manejo inadecuado de desechos orgánicos domésticos genera diversas problemáticas ambientales y de salud humana como la generación de gases efecto invernadero, contaminación de agua, propagación de vectores y enfermedades. Se evaluó la producción de biogás de un biodigestor a escala real para la valorización de una mezcla de desechos alimenticios y heces de perro. Se fabricó un sistema de dos fases de tipo tubular utilizando geomembrana de 1,00 mm de espesor con volúmenes de trabajo de 0,75 m<sup>3</sup> y 0,25 m<sup>3</sup> para las fases líquida y gaseosa, respectivamente. Una vez concluida la etapa de estabilización, durante el proceso de monitoreo de producción de biogás con duración de 31 días en condiciones psicrófilas, se obtuvo una producción promedio diaria de biogás de 101,66 L, con una composición promedio de 59,36 % de metano y alcanzó una eficiencia térmica de 39,95 %. El rendimiento promedio del sistema fue de 188,41 L kg<sup>-1</sup> de desechos.

### Palabras clave:

Valorización de residuos orgánicos; Gestión ambiental; Energía renovable; Metano.

## Psychrophilic anaerobic codigestion of food waste and dog feces in a homemade biodigester: biogas production and thermal efficiency

### Abstract

The inadequate management of domestic organic waste generates several environmental and human health problems such as the generation of greenhouse gases, water contamination, spread of vectors and diseases. The biogas production of a full-scale digester was evaluated for the recovery of a mixture of food waste and dog feces. A two-phase tubular-type system was manufactured using 1.00 mm thick geomembrane with working volumes of 0.75 m<sup>3</sup> and 0.25 m<sup>3</sup> for the liquid and gas phases, respectively. Once the stabilization stage was completed, during the biogas production monitoring stage lasting 31 days under psychrophilic conditions, an average daily biogas production of 101.66 L was obtained, with an average composition of 59.36 % methane, reaching a thermal efficiency of 39.95 %. The average yield of the system was 188.41 L kg<sup>-1</sup> of waste.

### Keywords:

Recovery of organic waste; Environmental management; Renewable energy; Methane.

**Forma de citar:** Zelaya-Benavides, E. A., Hernández-Teyssier, E. L., & Peredo-Mancilla, D. Codigestión anaeróbica psicrófila de desechos de alimentos y heces de perro en un biodigestor casero: producción de biogás y eficiencia térmica. RedBioLAC, 7, 35-43.

## Introducción

La generación de desechos orgánicos en las ciudades constituye un problema medioambiental ya que genera malos olores, proliferación de moscas y graves problemas de salud en las personas. Se estima que en México se producen más de 120 mil toneladas al día de desechos, principalmente en áreas urbanas, de los cuales el 46 % está compuesto por desechos orgánicos (SEMARNAT, 2020). En muchas localidades del país, el manejo de los desechos orgánicos por los servicios de recolección municipal se ve superado, por ejemplo, en la ciudad de Oaxaca, México, las autoridades han optado por alternativas para el aprovechamiento de los desechos orgánicos mediante composta en sitios de disposición final; sin embargo, esta estrategia relocaliza el problema en un lugar focalizado (Moy, 2022).

Entre los desechos orgánicos se encuentran en gran volumen los restos de comida (33,07 % de los desechos sólidos urbanos) y también, en muchos casos, heces de mascotas como los perros. En México hay 35 219 141 hogares de los cuales más de 25 millones albergan 80 millones de mascotas, principalmente perros (54,7 %) y gatos (20,2 %). Es decir, que en México existen un estimado de 43,7 millones de perros que viven en hogares y generan desechos orgánicos (INEGI, 2021), lo cual representa un problema ambiental y sanitario para las familias.

Como alternativa de aprovechamiento de desechos orgánicos generados en el hogar se propone el uso de biodigestores anaeróbicos de tipo tubular para el manejo de los desechos de comida y heces de perros debido a su bajo costo, fácil instalación y mínimo mantenimiento (Martí-Herrero, 2019), esto permite el manejo y revalorización de los desechos *in situ*. Los biodigestores anaerobios son equipos desarrollados para degradar la materia orgánica y generar biogás y biofertilizante líquido, el primero para aplicaciones

domésticas y el segundo como alternativa ecológica para la agricultura o en jardinería (Martí-Herrero, 2019).

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el funcionamiento de un biodigestor tubular de escala doméstica en producción de biogás y la eficiencia térmica del quemador a partir de la co-digestión de desechos de alimentos y heces de perro en condiciones psicrófilas.

## Metodología

### Ubicación del estudio

El estudio se realizó en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México (17° 01' 30,3' 'N y 96° 43' 12,5' 'W, a 1530 msnm), en condiciones térmicas psicrófilas. La temperatura ambiental fue registrada en el sitio durante todo el periodo del estudio cada 10 min las 24 h del día, con sensores HOBO® ProV2 (Onset, EUA), cuya temperatura ambiental promedio durante el periodo de evaluación fue de 20 °C, con mínima durante la noche de 10 °C y máxima durante el día de 30 °C (Figura 1).

### Instalación y manejo del biodigestor

Se instaló un biodigestor tubular de dos fases (líquida y gaseosa) marca ARQUEA®, fabricado con geomembrana de PVC de 1,00 mm (Figura N). La bolsa de la fase líquida fue para la digestión, a un volumen de trabajo de 0,75 m<sup>3</sup>, con tres tubos de 3", uno para la entrada de residuos, otro para la salida de biol, y uno para dirigir el biogás generado a la bolsa de fase gaseosa. La bolsa de la fase gaseosa se construyó para almacenar 0,25 m<sup>3</sup> de biogás (Figura 2). Como control de seguridad, el sistema tiene una válvula de alivio para liberar la presión por exceso de gas y válvulas para controlar el paso del biogás hacia el reservorio y de este hacia el quemador. La tubería y mangueras para la conducción del biogás al quemador fue de ½" de diámetro.

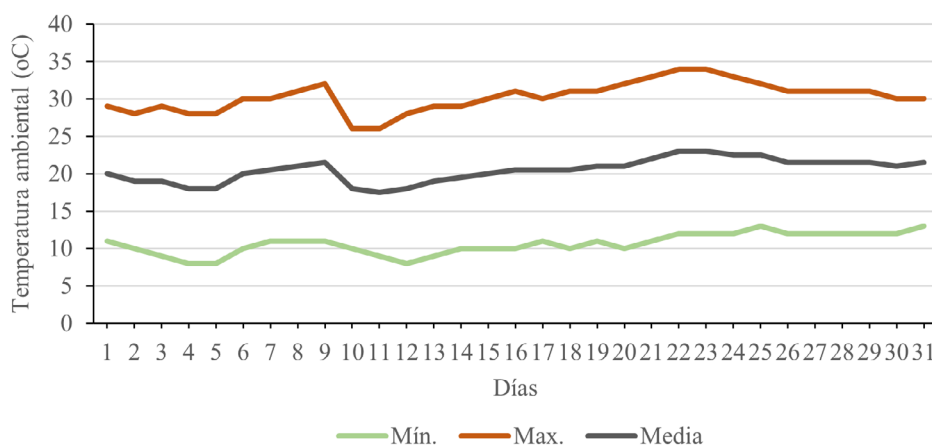
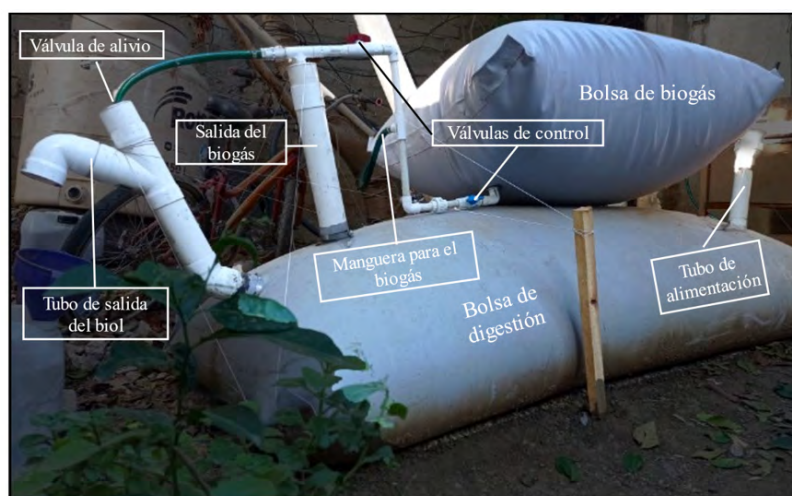


Figura 1 | Temperatura ambiental mínima, máxima y promedio en el sitio del estudio durante el periodo de evaluación.



**Figura 2 |** Biodigestor tubular doméstico de dos fases de geomembrana de PVC utilizado para este estudio.

Para el arranque del sistema, el biodigestor se llenó con 690 L de agua y se inoculó con 20 kg de estiércol fresco de bovino, 20 kg de contenido ruminal de bovino recolectado en el rastro municipal de Santa Cruz Xoxocotlán; y 20 litros de vinaza de mezcal donada por el palenque de mezcal artesanal “La Tierra del Jaguar”, del municipio de Tlacolula de Matamoros, Oaxaca, México. Desde la carga inicial hasta la primera producción de biogás pasaron 45 días y operó alimentado con desechos de alimentos (DA) y heces de perro (HP) durante 195 días hasta el inicio del periodo de

evaluación que se realizó durante 31 días, a partir del 08 de febrero del 2023, durante el cual se alimentó en promedio con 0,393 kg de DA (**Tabla 1**) y 0,0643 kg de HP, obtenidos a partir de las necesidades de dos personas adultas y un niño y un perro de la raza Beagle, respectivamente. Los residuos se introdujeron al biodigestor sin ningún tipo de pretratamiento (troceado, licuado, mezclado, etc.). Además, se agregó agua de la llave en proporción 2,2:1 con respecto a la cantidad de residuos totales alimentados por día. La tasa de carga orgánica fue de 0,032 kgSV m<sup>-3</sup>d<sup>-1</sup>.

**Tabla 1 |** Residuos de cocina utilizados para alimentar al biodigestor durante el periodo de estudio.

Tipo de residuos	Residuos	Frecuencia	Porcentaje (%)
Verduras		16	23,19
	Tomates	1	1,45
	Pimiento	3	4,35
	Zanahoria	2	2,90
	Papa	4	5,80
	Brócoli	2	2,90
	Coliflor	1	1,45
	Flor de Jamaica	1	1,45
	Lechuga	1	1,45
	Cilantro	1	1,45
Frutas		23	33,33
	Limón	6	8,70
	Plátano	4	5,80
	Mango	5	7,25
	Papaya	1	1,45
	Aguacate	3	4,35
	Manzana	3	4,35
	Zapote	1	1,45
Cereales		7	10,14
	Arroz	3	4,35
	Cereal	1	1,45
	Maíz (elote)	1	1,45
	Pasta	2	2,90

Continuación Tabla 1.

Tipo de residuos	Residuos	Frecuencia	Porcentaje (%)
Legumbres		7	10,14
	Lenteja	2	2,90
	Frijol	5	7,25
Lácteos		3	4,35
	Yogurt	2	2,90
	Queso	1	1,45
Carnes		5	7,25
	Res	3	4,35
	Chorizo	1	1,45
	Atún	1	1,45
Otros		8	11,59
	Cebolla	2	2,90
	Ajo	1	1,45
	Huevo	3	4,35
	Gelatina	1	1,45
	Mayonesa	1	1,45
TOTAL		69	100,00

### Métodos analíticos

El pH, sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) de los DA, HP e inóculo se determinaron por triplicado según APHA (APHA, 2012). El pH se determinó con un potenciómetro digital marca Hanna (Hanna Instruments®) en muestras líquidas recolectadas del interior del biodigestor a través de los tubos de entrada de residuos y salida de biol (biofertilizante líquido), respectivamente. Los ST se determinaron en estufa a 105 °C y los SV a 550 °C en mufla hasta peso constante, medido con balanza analítica digital (modelo MSL, Marca Metter Toledo®).

Se midió la producción de biogás diariamente utilizando un medidor de gas de diafragma de baja presión analógico comercial marca Keuk Dong Ki Jeong®. La producción diaria de biogás fue normalizada a condiciones estándar (273,15 °K y 1013 hPa) de acuerdo con la ecuación 1 (Dinuccio *et al.*, 2010).

$$V_0^{NPT} = V \frac{(P - P_v) T_0}{P_0 T} \quad (1)$$

Dónde;  $V_0^{NPT}$ : volumen de biogás seco normalizado a presión y temperatura estándar; V: volumen de biogás registrado (L), P: presión de la fase de biogás al momento de registro (hPa),  $P_v$ : presión del vapor de agua en función de la temperatura del sitio de medición (hPa),  $T_0$ : temperatura normal (273,15 °K),  $P_0$ : presión atmosférica normal (1013 hPa), T: temperatura del sitio de medición (°K). La presión del vapor de agua se determinó por medio de la ecuación 2 (NIST, 2023).

$$P_v = 10^{(A - \frac{B}{T+C})} \quad (2)$$

Dónde;  $P_v$ : presión del vapor de agua en función de la temperatura del sitio de medición (hPa), T: temperatura del sitio de medición (°K); A, B y C son parámetros de la ecuación de Antoine para el vapor de agua para las condiciones del estudio (5,40221; 1838,675; y -31,737; respectivamente).

El contenido de metano del biogás se determinó por medio de absorción de CO<sub>2</sub> con una solución de KOH al 20 % con la ecuación 3 (Abdel-Hadi, 2008).

$$\%CH_4 = 100\% - \left[ \left( \frac{V_1 - V_2}{V_1} * 100 \right) + 3\% \right] \quad (3)$$

Dónde; %CH<sub>4</sub>: el porcentaje de metano en el biogás, V<sub>1</sub>: volumen de biogás antes de la remoción de CO<sub>2</sub> (mL), V<sub>2</sub>: volumen de metano y otros gases después de la remoción de CO<sub>2</sub> (mL), y 3%: contenido de H<sub>2</sub>S y otros gases.

La eficiencia térmica del quemador se realizó de acuerdo con la metodología del “Water Boiling Test”, la cual determina la proporción de la energía recibida respecto a la energía entregada, calculada por medio de la ecuación 4 (CCA, 2014).

$$h_c = \frac{[(\frac{M_a * \Delta T * c}{1000}) + (M_{av} * H)]}{V_{biogás} * \%CH_4 * PC_{CH_4}} \quad (4)$$

Dónde;  $h_c$ : eficiencia térmica (%),  $M_a$ : masa de agua inicial (kg),  $\Delta T$ : variación de temperatura de la masa de agua hasta punto de ebullición 95 °C (Tf-Ti), c: calor específico del agua (4.2 KJ kg<sup>-1</sup> K),  $M_{av}$ : masa de agua evaporada (kg), H: entalpía del vapor de agua (2,26 MJ kg<sup>-1</sup>),  $V_{biogás}$ : volumen de

biogás gastado ( $m^3$ ) de acuerdo con el porcentaje de apertura de la válvula de control (**Figura 3**),  $\%_{CH_4}$ : porcentaje de metano en el biogás,  $PC_{CH_4}$ : poder calorífico del metano ( $34 MJ m^{-3}$ ).

## Resultados y discusión

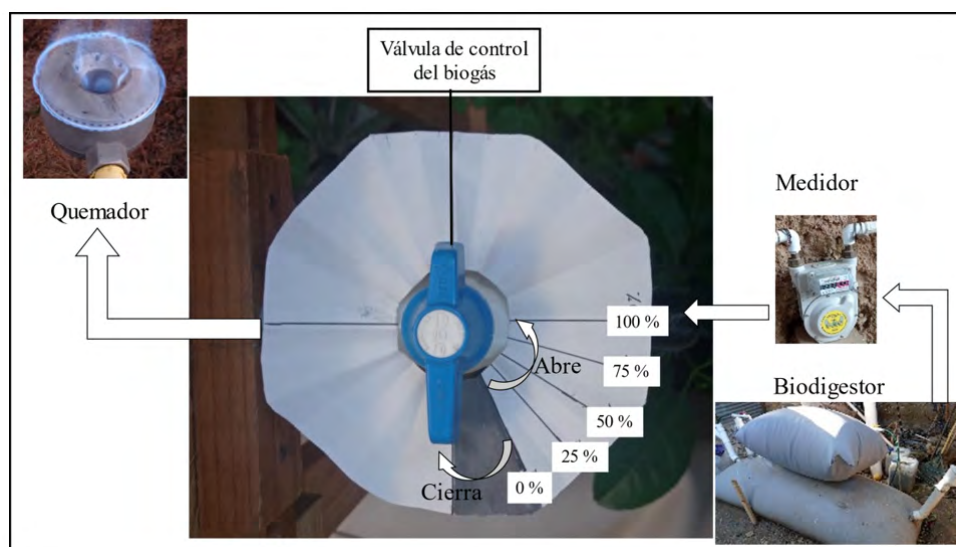
### Caracterización del inóculo y sustrato

El pH de los residuos utilizados para alimentar al biodigestor fue ácido para DA y ligeramente alcalino para HP. El contenido de ST y SV fue mayor en las HP que DA (**Tabla 2**). La proporción de SV/ST en HP fue del 54,78%; mientras que en DA dicha proporción representó el 9,67%. Los valores de los parámetros fisicoquímicos del inóculo utilizado para el arranque del biodigestor al inicio de su operación estuvieron en niveles óptimos para la digestión anaeróbica (7,0-8,5), con pH cercano al nivel neutral (**Holliger et al., 2021**). Por otro lado, el contenido de ST en DA de este estudio (17,68 %) fue similar a DA utilizadas

por **Zhang et al. (2011)** en un estudio de co-digestión con heces porcinas (18,10 % ST). El contenido de ST en HP de este estudio (53,30 %) fue mayor a lo reportado en otros estudios, por ejemplo, **Sonda-Hernández et al. (2021)** reportó un contenido de 35,70 %. Lo anterior es un factor para tener en cuenta al momento de inferir información a partir de los resultados presentados, no obstante, conocer el comportamiento de un biodigestor a escala real en condiciones domésticas representa un aporte para la difusión de la tecnología.

### pH de entrada y salida

Los valores del pH en el interior de la fase líquida del biodigestor se mantuvieron en niveles óptimos para la digestión anaeróbica (7,0-8,5) durante el periodo de evaluación, si bien, el pH en la entrada fue ligeramente ácido, en la salida (biol) fue neutro a ligeramente alcalino. El pH en la entrada fue en promedio de  $6,83 \pm 1,14$  y en la salida (biol) fue en promedio de  $7,16 \pm 0,28$  (**Figura 4**).



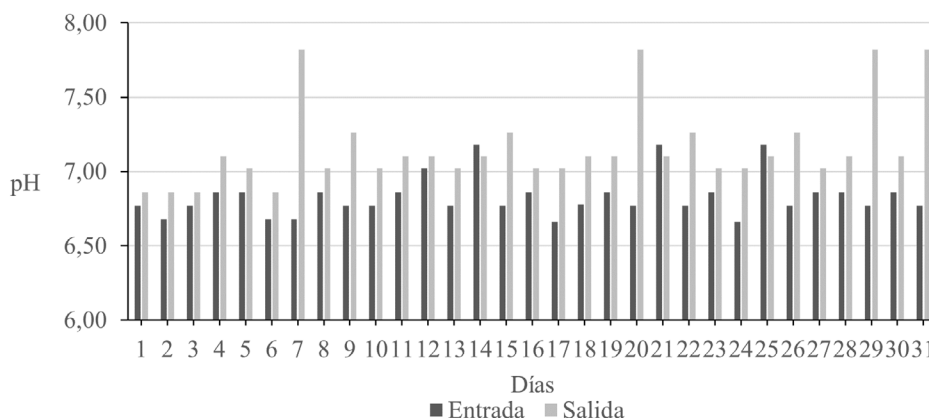
**Figura 3** | Regulación de apertura de la válvula de control de biogás para las pruebas de eficiencia térmica.

**Tabla 2** | Parámetros fisicoquímicos del inóculo, desechos de alimentos y heces de perro utilizados para alimentar el biodigestor.

Parámetro	Inóculo	DA	HP
pH	7,35 $\pm$ 0,01	4,08 $\pm$ 0,01	7,70 $\pm$ 0,02
ST (%)	16,64 $\pm$ 0,21	17,68 $\pm$ 0,12	53,30 $\pm$ 0,34
ST (g/kg)	163,43 $\pm$ 2,07	176,82 $\pm$ 1,19	533,00 $\pm$ 3,37
SV(g/kg)	108,92 $\pm$ 0,17	17,11 $\pm$ 0,01	292,73 $\pm$ 3,53

Nota: desechos de alimentos (DA), heces de perro (HP), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV).





**Figura 4** | pH de entrada y salida del biodigestor doméstico de dos fases alimentado con DA y HP.

Los DA contenían un 33 % de frutos ácidos (limones) (Tabla 1), lo cual provocó un pH ácido y fue la posible causa de inhibición de actividad metanogénica, para esta etapa un rango de pH de 6,88-8,20 es óptimo para la metanogénesis (Castro *et al.*, 2017), no obstante, el pH, tanto a la entrada como a la salida del biodigestor en este estudio, se encontraba en ese rango. Por otro lado, la presencia de HP y el inóculo en el arranque mostraron un pH ligeramente alcalino; así como por el inóculo previamente cargado en el arranque, favoreciendo la capacidad buffer para amortiguar los cambios de pH en co-digestión. En contraste, Sonda-Hernández *et al.* (2021) inocularon el biodigestor solamente con 1 kg de estiércol de bovino y 10 kg de HP, observaron un descenso de pH al rango entre 5,50 y 6,20 en los primeros 23 días, y para alcalinizar el sustrato a valores de pH entre 7,00 y 7,50 añadieron hidróxido de sodio a partir del día 32. Esto no fue observable en el presente estudio, ya que el pH se mantuvo durante los primeros 23 días en el rango

de 6,70 – 7,20, adjudicable por la co-digestión con DA e inóculo. Del mismo modo, Zhang *et al.* (2011) observaron la disminución del pH durante la digestión anaeróbica de DA después de 40 días de operación hasta valores inhibitorios, en cambio, cuando hicieron co-digestión con estiércol de cerdo el pH se mantuvo estable.

### Carga de residuos y rendimiento de biogás

Durante el periodo de evaluación se alimentó el biodigestor con 14,11 kg de residuos, con un promedio diario de 0,46 kg, compuesto por un 84,78 % (0,39 kg) de DA y 15,22 % (0,06 kg) de HP, para facilitar la introducción de los desechos a la bolsa de digestión por el tubo de entrada se usó un tramo de tubo de ½” y se agregó agua. En cuanto al biogás obtenido, el rendimiento fue de 188,41 L por cada kilogramo de residuos introducidos al sistema (Tabla 3).

**Tabla 3** | Cantidad de residuos alimentados al biodigestor y biogás obtenido durante el periodo de estudio.

Parámetro	Promedio diario	Total*
Residuos		
DA (kg)	0,39 ±0,57	12,18
HP (kg)	0,06 ±0,09	1,93
DT (kg)	0,46 ±0,60	14,11
Agua (L)	0,98 ±1,49	29,50
Carga diaria (kg)**	1,41 ±1,99	43,61
Biogás obtenido		
Producción de biogás (L)***	101,66 ±14,03	3151,47
Rendimiento de biogás (L kg <sup>-1</sup> <sub>res.</sub> )	188,41 ±68,02	
Rendimiento volumétrico de biogás (L m <sup>-3</sup> <sub>biod.</sub> día <sup>-1</sup> )	135,55 ±18,70	

Nota: desechos de alimentos (DA), heces de perro (HP), residuos totales (DT), desviación estándar (±), residuo (res.), biodigestor (biod.), \*de 31 días de evaluación, \*\*equivalencia de 1 kg=1L. \*\*\*Datos normalizados a temperatura y presión estándar (273,15 °K y 1013 hPa).

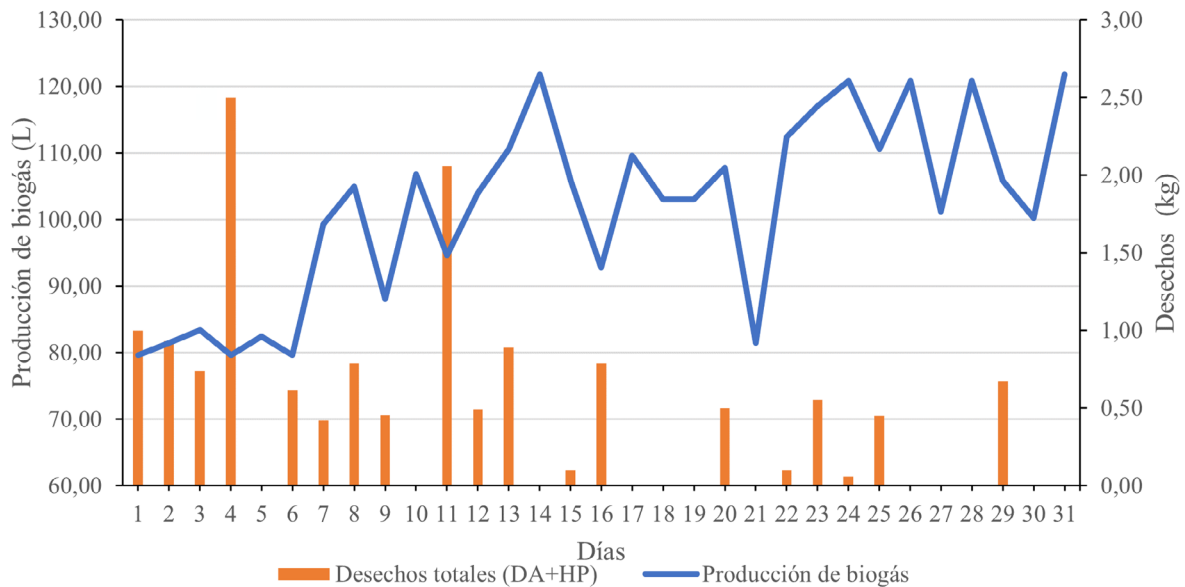
El rendimiento de biogás obtenido en el presente estudio muestra la eficiencia del proceso y la co-digestión. En comparación con lo reportado por [Sonda-Hernández et al. \(2021\)](#) el rendimiento de este estudio fue 25,81 veces mayor, ya que se obtuvieron  $7,30 \text{ L kg}^{-1}$  de HP y 8,0 veces más a lo reportado por [Zhang et al. \(2011\)](#) ( $23,55 \text{ L kg}^{-1}$ ) al emplear DA. Por otro lado, [Martí-Herrero et al. \(2019\)](#) emplearon un biodigestor a escala real para tratar desechos orgánicos municipales que funcionaron en condiciones psicófilicas y se alimentó con desechos de fruta y vegetales, y cuyo rendimiento de biogás estuvo entre  $18,34$  y  $24,94 \text{ L kg}^{-1}$ , siendo aún mayor el rendimiento obtenido en este estudio. No obstante, reportaron un rendimiento volumétrico de biogás entre  $190$  y  $270 \text{ L m}^{-3} \text{ biod. día}^{-1}$ ; 1,41 y 2,0 veces mayor al del presente estudio ( $135 \text{ L m}^{-3} \text{ biod. día}^{-1}$ ), valores atribuidos a la tasa de alimentación orgánica porque fue de  $0,56$  y  $1,06 \text{ kg}_{\text{SV}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ; mientras que en el presente estudio fue de  $0,032 \text{ kg}_{\text{SV}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ .

### Producción diaria de biogás

La producción de biogás durante el periodo de estudio fue constante, el contenido de metano fue en promedio de 59,36 % ( $\pm 5,41$ ) con un promedio de  $101,66 \text{ L día}^{-1}$ , lo cual abasteció de energía renovable para cocinar durante 18

minutos  $\text{día}^{-1}$ . No obstante, se observó una disminución en la producción diaria entre el segundo y tercer día después de no alimentar, ya que las actividades de los habitantes no generaron residuos para alimentar al biodigestor. Por ejemplo, los días 17, 18 y 19 no se alimentó al sistema, por lo que se registró un descenso en la producción de biogás el día 21. Por el contrario, se observaron tres repentes en la producción de biogás entre el segundo y tercer día después de alimentar con residuos en los días 7, 10 y 14, porque se realizaron cargas el día 4, 8 y 11, respectivamente ([Figura 5](#)).

El contenido de metano del biogás obtenido a partir de los DA y HP del presente estudio (59 %) fue superior a lo reportado por [Martí-Herrero et al. \(2019\)](#) (43 %) al digerir desechos orgánicos municipales, por lo cual es posible utilizarlo como fuente energética al tener más del 45 % ([Walsh, 1988](#)). El biogás producido en el presente estudio se utilizó para preparar café y comida para el desayuno. La producción diaria de biogás estuvo influida por la disponibilidad de desechos, similar al patrón de respuesta a las cargas orgánicas realizadas en el estudio de [Martí-Herrero et al. \(2019\)](#). Lo anterior se explica por la disponibilidad de alimentos para las bacterias y arqueas, las cuales transforman los desechos en biogás.



**Figura 5** | Producción de biogás a partir de desechos de alimentos (DA) y heces de perro (HP) en biodigestor tubular domiciliario a escala real.

### Eficiencia térmica de quemador a biogás:

La eficiencia térmica del quemador utilizado para aprovechar el biogás generado con DA y HP disminuyó a medida que se abría la válvula y, por lo tanto, el caudal de biogás entregado al quemador. La mayor eficiencia térmica fue de 39,95 %, y se logró con una apertura de la válvula al 25 % cuyo caudal de biogás fue de 0,326 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>; mientras que la menor eficiencia fue de 14,97 % con el 100 % de apertura y con un caudal de 1,295 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (Tabla 4).

La prueba de la eficiencia térmica con el método de agua hirviendo mide la proporción de energía recibida por determinada masa de agua en relación con la energía entregada por el metano del biogás. En este estudio se comprobó que con la apertura de la válvula al 25 %, igual a un caudal de biogás de 0,326 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, se obtuvo la mayor

eficiencia térmica (39 %) en relación con los demás niveles de apertura; lo cual es clave para optimizar el uso del biogás en sistemas de energía renovable de pequeña escala, como el del presente estudio, y aprovechar el biogás en consumo energético doméstico para preparar café y comida para el desayuno. Estos resultados, son cercanos a la eficiencia de estufas diseñadas para consumo de combustibles gaseosos como el gas LP cuya eficiencia térmica máxima es del 45 % (Viquez *et al.*, 2018). Sin embargo, la menor eficiencia térmica (14,97 %) obtenida con la apertura de la válvula al 100 %, fue similar a la eficiencia de estufas tradicionales cuyo combustible es la madera o leña (15 %) (Viquez *et al.*, 2018). Estos resultados indican la importancia de mejorar la eficiencia de los quemadores a biogás para aprovechar al máximo la revalorización de los desechos tratados en el biodigestor.

Tabla 4 | Eficiencia térmica del quemador a biogás obtenido de desechos de alimentos y heces de perro.

Apertura de la válvula (%)	Q (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	t-95 °C (min)*	B (MJ energía recibida)			A (MJ energía entregada)				h <sub>c</sub> (%)
			En agua	En vapor	Total	V <sub>bg</sub> (m <sup>3</sup> )*	% CH <sub>4</sub> (v/v)	PC <sub>CH4</sub> (MJ m <sup>-3</sup> )	Total (MJ)	
25	0,326	12,08	0,42	0,11	0,53	0,066	0,59	34,00	1,32	39,95
50	0,632	8,00	0,41	0,16	0,57	0,084	0,59	34,00	1,70	33,21
75	0,840	8,50	0,40	0,14	0,54	0,119	0,59	34,00	2,40	22,39
100	1,295	7,90	0,41	0,10	0,52	0,171	0,59	34,00	3,44	14,97

Nota: caudal de biogás (Q), \*tiempo hasta el punto de ebullición (95 °C) de un litro de agua, mega joule (MJ), volumen de biogás gastado (V<sub>bg</sub>), poder calorífico (PC), eficiencia térmica (h<sub>c</sub>). \*\*Datos normalizados a temperatura y presión estándar (273,15 °K y 1013 hPa).

### Conclusiones

A partir de la codigestión de 0,36 kg de DA y 0,06 kg HP en un biodigestor tubular de dos fases en condiciones psicrófilas se logró la generación de 101,66 L de biogás por día con un 59 % de metano, de modo que el rendimiento promedio fue de 188,41 litros por kilogramo de desechos alimentado. Este rendimiento es mayor a la mayoría de los valores reportados en la literatura para residuos similares, lo que se atribuye a la tasa de alimentación orgánica, así como a la cantidad de sólidos totales presentes en la mezcla de residuos utilizados para la producción de biogás en el presente estudio.

El sistema biodigestor produjo un efluente con un pH de 7,16, valor adecuado para la fertilización de suelos. La producción de biogás se mantuvo constante durante el periodo de medición (31 días), se presentaron descensos en días posteriores a nula alimentación, pero su producción se reguló luego de una nueva alimentación. El uso del biogás

en un quemador con caudal de 0,326 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (5,4 L min<sup>-1</sup>) genera una eficiencia térmica de 39 %, energía necesaria para cocinar durante 18 min por día.

### Agradecimientos

A la Dra. Liliana Castro por su asesoría para realizar la normalización de los datos de biogás obtenidos durante el estudio.

### Referencias

- Abdel-Hadi, M. A. (2008). A simple apparatus for biogas quality determination. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 25(3), 1055–1066.
- APHA. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd.). American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.



- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>
- CCA. (2014). The Water Boiling Test Version 4.2.3. Cookstove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory Setting. <https://cleancooking.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>.
- Dinuccio, E., Balsari, P., Gioelli, F., & Menardo, S. (2010). Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology*, 101(10), 3780–3783. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.12.113>
- Holliger, C., Astals, S., de Lacos, H. F., Hafner, S. D., Koch, K., & Weinrich, S. (2021). Towards a standardization of biomethane potential tests: a commentary. *Water Science and Technology*, 83(1), 247–250. <https://doi.org/10.2166/WST.2020.569>
- INEGI. (2021). Encuesta Nacional de Bienestar Autorreportado (Enbiare). Disponible en: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enbiare/2021/doc/enbiare\\_2021\\_nota\\_tecnica.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enbiare/2021/doc/enbiare_2021_nota_tecnica.pdf)
- Martí-Herrero, J., Soria-Castellón, G., Diaz-de-Basurto, A., Alvarez, R., & Chemisana, D. (2019). Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, 133, 676–684. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.10.030>
- Moy, V. (2022). Oaxaca entre basura. Centro de Investigación en Política Pública. Disponible en: <https://imco.org.mx/oaxaca-entre-basura/>
- NIST. (2023). Water. Antoine Equation Parameters. Libro del Web de Química del National Institute of Standards and Technology, SRD 69. Available at: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.ID=C7732185&Mask=4&Type=ANTOINE&Plot=on>
- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. México, 2020. Acceso: 02 de octubre de 2021. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- Sonda-Hernández, M., León-Galván, Ma. F., & Gutiérrez-Vargas, S. (2021). Generación de biogás como alternativa para aprovechamiento de heces caninas domésticas. *RINDERESU*, 5(2), 758–771. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/106>.
- Viquez, J., Caydiid, M., & Adhiambo Omondi, P. (2018). Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás. *RedBioLAC*, 2, 8–13.
- Walsh, J. (1988). Handbook on biogas utilization. Environment Health and Safety Division Georgia Tech Research Institute. Available at: <https://www.build-a-biogas-plant.com/PDF/Handbook%20on%20Biogas%20Utilization.pdf>
- Zhang, J., Hu, Q., Qu, Y., Dai, Y., He, Y., Wang, C. H., & Tong, Y. W. (2020). Integrating food waste sorting system with anaerobic digestion and gasification for hydrogen and methane co-production. *Applied Energy*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113988>
- Zhang, L., Lee, Y. W., & Jahng, D. (2011). Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. *Bioresource Technology*, 102(8), 5048–5059. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.082>