

# Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás

## Anaerobic digestivity of wastewater biosolids using the Oxitop system to estimate biogas production

Marian Ramírez<sup>1</sup>, Euclides Deago,<sup>2,3\*</sup> Nathalia Flores Tejedor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

<sup>3</sup>Grupo de Biosólidos: Energía y Sostenibilidad

\*Autor de correspondencia: [euclides.deago@utp.ac.pa](mailto:euclides.deago@utp.ac.pa)

**RESUMEN**— Panamá experimenta un crecimiento económico sostenido en los últimos 10 años. Esto trae como consecuencia algunos potenciales problemas, como es la acumulación de biosólidos de aguas residuales (BioAR) y que estos son dispuestos en rellenos sanitarios. Por ejemplo, hasta el año 2014 se depositaron aproximadamente 75946 toneladas de BioAR en el principal relleno sanitario de Panamá. Esta situación genera una gran presión a la gestión de manejo de desechos y a nivel ambiental. En este sentido, nuestra investigación se basó en el estudio de digestividad anaeróbica de BioAR usando el sistema Oxitop, a fin de estimar la cinética y potencial generación de biogás para su posible aprovechamiento. La caracterización de BioAR estudiados de diversas actividades económicas indican su viabilidad para usarlos, dada sus bajas concentraciones de contaminantes y su alto contenido de materia orgánica. Los ensayos de digestividad indican que los rangos de producción de biogás estuvieron entre 9.6 y 41.56 mL CH<sub>4</sub>/g SV. Dichos valores son bajos en comparación con los reportados en la literatura y no tendrían la capacidad para sostener una actividad de generación eléctrica; sin embargo, es posible aprovechar estos biosólidos si son mezclados con otros sustratos orgánicos para mejorar los rendimientos de producción de biogás.

**Palabras clave**— Digestión anaeróbica, biogás, biosólidos de aguas residuales, Oxitop.

**ABSTRACT**— Panama experiences sustained economic growth in the last 10 years. This results in some potential problems, such as the accumulation of wastewater biosolids (WWB) and they are disposed in landfills. For example, until 2014, approximately 75946 tons of WWB were deposited in the main Landfill in Panama. This situation generates great pressure on waste management and environmental management. In this sense, our research was based on the study of anaerobic digestivity of WWB using the Oxitop system, in order to estimate the kinetics and potential generation of biogas for its possible use. The characterization of WWB studied from various economic activities indicates their viability to use them, given their low concentrations of pollutants and their high content of organic matter. Digestivity tests indicate that the biogas production ranges were between 9.6 and 41.56 mL CH<sub>4</sub> /g SV. These values are low compared to those reported in the literature and would not have the capacity to sustain an electricity generation activity; however, it is possible to take advantage of these biosolids if are mixed with other organic substrates to improve biogas production yields.

**Keywords**— Anaerobic digestion, biogas, wastewater biosolids, Oxitop.

## 1. Introducción

A nivel internacional existen tendencias crecientes en aprovechar cada vez más los subproductos derivados del saneamiento de las aguas residuales, específicamente los biosólidos de aguas residuales (BioAR) [1]. Estos BioAR son estudiados como materia prima para la generación de

biogás, el cual es usado para la generación eléctrica. Esta generación de biogás es obtenida por medio de la digestión anaeróbica. Por ejemplo, en Estados Unidos la tecnología de digestión anaeróbica ha sido potenciada para la producción de biogás obtenido de granjas agrícolas, BioAR, en otras fuentes, con el objetivo de producir energía para abastecer a 3 millones de familias

**Citación:** M. Ramírez, E. Deago y N. Flórez, "Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema oxitop para estimar la producción de biogás", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

**Tipo de artículo:** Original. **Recibido:** 30 de agosto de 2019. **Recibido con correcciones:** 16 de marzo de 2020. **Aceptado:** 7 de julio de 2020.

**DOI:**

**Copyright:** 2020 M. Ramírez, E. Deago y N. Flórez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

[2]. De igual forma, México se encuentra desarrollando investigación para el aprovechamiento de BioAR, dado que generan más de 600,000 toneladas anuales [3].

Actualmente, en la Ciudad de Panamá los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales (STAR), están generando gran cantidad de BioAR. Según informes del año 2017, el Relleno Sanitario de Cerro Patacón recibió 24,013 toneladas de lodos, 9.2 % más que el año 2016 [4]. Los biosólidos depositados en Cerro Patacón tienen diferentes procedencias: hay de origen industrial, tanques sépticos; trampas de grasa y aquellos que se derivan de letrinas portátiles; los cuales mayormente eran dispuestos sin un pretratamiento [5].

A raíz de esta situación, desde el año 2018, la administración del Relleno Sanitario de Cerro Patacón suspendió la recepción de biosólidos de aguas residuales (BioRA), debido a que presentan limitaciones para absorberlos y tratarlos. Actualmente, los únicos BioAR que recibe Cerro Patacón son los generados en la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Juan Díaz, que atiende a la Ciudad de Panamá, la cual genera en promedio 83 toneladas por día, dado que los mismos están deshidratados a un 75% de humedad y son aprovechados como material de cobertura [6].

Debido al aumento de la generación de BioAR, se abre una oportunidad en Panamá, para realizar investigación que permitirá generar información referente a las características físico-químicas de los BioAR y establecer el potencial uso de estos. Como se indicó, uno de los principales aprovechamientos que se han identificado es la generación de electricidad derivado de la producción de biogás. Por ejemplo, desde el punto de vista económico, un informe realizado y publicado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), señala que los costos de las distintas energías renovables en el 2018 indican que existe una caída considerable de los costos globales de la electricidad, donde resalta que la bioenergía es la que presenta mayor baja (14%) [7].

El uso de BioAR para producir bioenergía es una opción que tiene muchas posibilidades en Panamá, porque el marco regulatorio existente ofrece incentivos por el uso de nuevas tecnologías [8]. Además, existen políticas nacionales que se enmarcan en temas de sostenibilidad; tal es el caso del Plan Energético Nacional 2015-2050 (PEN), que entre sus lineamientos está la descarbonización de la matriz energética del país y su

diversificación [9]. Es por ello, que se busca conocer el potencial para producir metano, derivado de la digestión anaeróbica de BioAR.

Las actividades seleccionadas en la investigación de BioAR fueron: avícola (sacrificio de aves de corral, comercial y hotelero). Cabe destacar que los STAR seleccionados son aeróbico de tipo lodos activados [10].

## 2. Métodos y Materiales

### 2.1 Muestreo de biosólidos

El muestreo realizado en los STAR seleccionados se basó en lo dispuesto en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 47-2000 [11]. Los BioAR fueron muestreados por un período de seis meses desde octubre de 2018 hasta marzo de 2019. El BioAR de la actividad avícola tenía una coloración rojiza (figura 1a), con alto contenido de humedad, grasas y restos de plumas, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura [12]; los BioAR comerciales, tenían coloración marrón claro (figura 1b), con consistencia semi- líquida, dado que fue muestreado en el lecho de secado. En tanto, el BioAR de la actividad hotelera mantuvo una consistencia compacta con poca humedad y con coloración marrón oscuro (ver figura 1c).

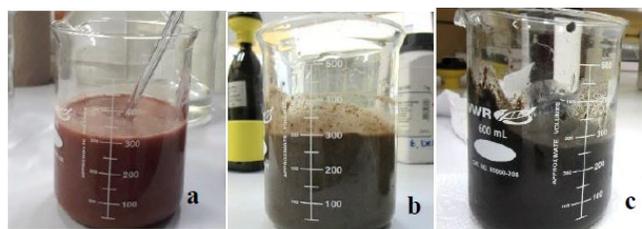


Figura 1. BioAR muestreados en STAR de actividades económicas estudiadas: a) Avícola; b) Comercial y c) Hotelera.

### 2.2 Caracterización físico-química de biosólidos

Las muestras de BioAR obtenidas de los STAR de las tres actividades económicas estudiadas se analizaron en el Laboratorio de Sistemas Ambientales del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá. A estas muestras se les determinó DQO, nitrato, pH, conductividad, Sólidos Volátiles y Fijos, según Standard Methods [13]. Para verificar el contenido de metales pesados definidos en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 47-2000 [11], las muestras se enviaron a un laboratorio especializado (tabla 2). Estos parámetros se determinaron según las normas de la EPA [14].

### 2.3 Configuración de reactores batch de digestividad anaeróbica con sistema Oxitop

Para determinar la generación de biogás, producto de la digestión anaeróbica de los BioAR, se usó el Sistema Oxitop (figura 12 a); el cual se basa en mediciones manométricas, es decir que registra delta de presiones que se producen por los procesos de digestión anaeróbicos. Este método es muy apropiado para la determinación de la degradabilidad y para obtener tasas de hidrólisis, ya que el Sistema Oxitop permite registrar presiones generadas por los gases generados por el proceso de digestión anaeróbica.

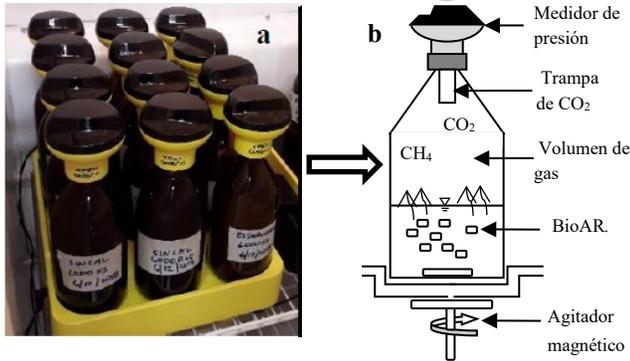


Figura 2. a) Sistema Oxitop b) Componente y funcionamiento del Sistema Oxitop

El Sistema Oxitop consiste en una serie de botellas ámbar de 500 mL, con cabezales digitales que registran presiones internas producidas por gases generados. Además, cuenta con una base magnética que agita el contenido de las botellas. La presión registrada en las cabezas de medición [15] (figura 2 b).

Los ensayos de digestividad se realizaron en duplicado a 25°C. En cada reactor batch (botellas ámbar de 500 mL) se usó un volumen de trabajo de 300mL, de los cuales el 50% correspondía a BioAR. Estos ensayos se realizaron por períodos de tiempo comprendido entre 700 y 800 horas. Durante este período los reactores se mantuvieron agitados. En tanto, para registrar la presión neta debido al gas metano formado por la digestión anaeróbica, se empleó trampas de NaOH para remover CO<sub>2</sub>, que es otro subproducto de este proceso (figura 2b).

### 2.4 Estimación del Potencial Bioquímico de Metano

Para la estimación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) se hizo en base a ecuaciones que toman como referencia la Ley General de los gases, las cuales han sido adecuados por varios investigadores [16], [17] y

[18]. En este sentido, la variable experimental usada en la estimación del PBM es la presión obtenida en los ensayos batch registrada por el Sistema Oxitop. Con estas ecuaciones se determinan el volumen de metano.

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas para calcular el PBM y los parámetros usados (tabla 1):

$$n_{CH_4} = \frac{\Delta P * V_l}{R * T_e} \quad (1)$$

**n<sub>CH<sub>4</sub></sub>**: Moles de CH<sub>4</sub> (mol); **ΔP**: Incremento de Presión en Sistema Oxitop (hPa); **R**: Constante de gases ideales (atm\*mL/mol\*K); **T<sub>e</sub>**: Temperatura de ensayo (°K).

$$V_{CH_4-CE} = \frac{n_{CH_4} * R * T_{CE}}{P_{CE}} \quad (2)$$

**V<sub>CH<sub>4</sub>-CE</sub>**: Volumen de metano en condiciones estándar (mL); **P<sub>CE</sub>**: Presión a condiciones estándar (atm)

$$H_{CH_4} = 10^{\frac{-675.74}{T_e} + 6.88} \quad (3)$$

**H<sub>CH<sub>4</sub></sub>**: Constante de Henry para el CH<sub>4</sub> (atm).

$$X_{CH_4 \text{ disuelto}} = \frac{\Delta P}{H_{CH_4}} \quad (4)$$

**X<sub>CH<sub>4</sub>disuelto</sub>**: Fracción molar de CH<sub>4</sub> disuelto.

$$M_{CH_4 \text{ disuelto}} = \frac{M_{H_2O} * X_{CH_4 \text{ disuelto}}}{1 - X_{CH_4 \text{ disuelto}}} \quad (5)$$

**M<sub>CH<sub>4</sub>disuelto</sub>**: Concentración molar de CH<sub>4</sub> disuelto (mol\*mL<sup>-1</sup>); **M<sub>H<sub>2</sub>O</sub>**: Concentración molar del agua (mol\*mL<sup>-1</sup>); **X<sub>CH<sub>4</sub>disuelto</sub>**: fracción molar de CH<sub>4</sub> disuelto.

$$n_{CH_4 \text{ disuelto}} = M_{CH_4 \text{ disuelto}} * V_u \quad (6)$$

**n<sub>CH<sub>4</sub>disuelto</sub>**: Moles de CH<sub>4</sub> disuelto (mol); **V<sub>u</sub>**: volumen útil en reactor (mL)

$$V_{CH_4 \text{ disuelto}-CE} = \frac{n_{CH_4 \text{ disuelto}} * R * T_e}{\Delta P} \quad (7)$$

**V<sub>CH<sub>4</sub>disuelto-CE</sub>**: Volumen de CH<sub>4</sub> disuelto en condiciones estándar (mL)

$$V_{TCH_4-CE} = V_{CH_4-CE} + V_{CH_4 \text{ disuelto}-CE} \quad (8)$$

**V<sub>CH<sub>4</sub>-CE</sub>**: Volumen de CH<sub>4</sub> en condiciones estándar (mL)

$$PBM = \frac{V_{TCH_4}}{g_{SV}} \quad (9)$$

**g SV**: Sólidos Volátiles del sustrato. (g); **PBM**: Potencial Bioquímico de Metano (mL/g SV).

Tabla 1. Valores de constantes y parámetros usados en la estimación del Potencial Bioquímico de Metano

Parámetros	Unidades	Valor	Referencias
R	Atm*mL/mol*K	0.08205746	
H <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Atm	41073.04816	
M <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Mol/mL	0.181642	
P <sub>CE</sub>	Atm	1.0	Este estudio
T <sub>CE</sub>	°K	273.15	
T <sub>e</sub>	°K	298.15	Este estudio
V <sub>u</sub>	L	0.5	Este estudio

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Calidad físico-química de BioAR estudiados

Los BioAR de cada actividad económica se mantuvo en rangos de valores permisibles definidos por la Norma COPANIT 47-2000. Para el caso de los parámetros como el DQO, se encontró que los mayores valores fueron detectados en la actividad avícola, cuyo valor promedio durante los seis meses de estudio fue de 924mg/L, en comparación con las actividades comercial (236.3 mg DQO/L) y hotelera (204.17mg DQO/L) (tabla 2).

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos de BioAR de las actividades económicas estudiadas durante seis meses

Actividades	Parámetros	Periodo de Caracterización					
		2018			2019		
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Avícola	pH	5.8	6.4	6.2	6.48	6.5	6.6
	DQO (mg/L)	775	241	1356	1441	857	874
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	2.5	2.06	1.95	1.75	3.06	1.56
	SV (%)	91.6	59.9	83.5	45.8	44	60.5
	SF (%)	8.4	40.1	16.5	54.2	56	39.5
Comercial	pH	7.4	6.4	7.54	7.69	7.8	7.8
	DQO (mg/L)	202	370	200	152	260	234
	NO <sub>3</sub> (mg/L)	1.9	1.05	1.6	3.5	2.3	3.16
	SV (%)	69.5	72.4	57.5	41.7	71.9	69.3
	SF (%)	30.5	27.6	42.5	58.3	28.1	30.7
Hotelera	pH	6.9	6.9	6	7	6.5	7.2
	DQO (mg/L)	243	365	216	120	181	100
	NO <sub>3</sub> (mg/L)	1.9	0.85	2.86	1.25	3.66	1.06
	SV (%)	74.3	74.6	50.1	56.7	69.3	72.5
	SF (%)	25.7	25.4	49.9	43.3	30.7	27.5

**Tabla 3.** Los resultados metales pesados obtenido en una muestra de BioAR de las actividades económicas estudiadas

Parámetros	Actividades económicas			COPANIT 47-2000	
	Avícola	Comercial	Hotelera	Tabla 3.1	Tabla 3.2
Coliformes Fecales (UFC/g)	2.8x10 <sup>8</sup>	1.2x10 <sup>4</sup>	1.1x10 <sup>5</sup>	2000	2000
As ( mg/kg)	<0.001	<0.001	2.6	75	40
Cr ( mg/kg)	4,070	15.8	7.4	3000	1500
Cd ( mg/kg)	<0.001	1.1	0.365	85	40
Cu ( mg/kg)	33.6	425	1390	4300	1500
Hg ( mg/kg)	<0.001	<0.001	<0.001	57	25
Mo ( mg/kg)	0.414	5.11	1.41	75	25
Ni ( mg/kg)	5,540	156	30.6	420	420
Pb ( mg/kg)	1,530	31.6	3.35	840	300
Se ( mg/kg)	3.84	<0.001	<0.001	100	50
Zn ( mg/kg)	118	1090	551	7500	3000

En cuanto al perfil de metales pesados, los resultados obtenidos demostraron que los BioAR tenían muy bajas concentraciones, lo cual se ajusta a los valores permisibles (tabla 3). Estos resultados son muy

importantes, porque descarta la posibilidad de inhibición de las bacterias por la presencia de metales pesados

#### 3.2 Potencial Bioquímico de Metano

Los resultados experimentales demuestran una variación de la generación de biogás o PBM en la digestión anaeróbica de BioAR de cada actividad económica durante los seis meses de monitoreo (Figura 3). Los valores de PBM se presentan como el volumen de metano generado por gramo de BioAR seco. Los valores de PBM de cada actividad fueron: Avícola: 10.6mL CH<sub>4</sub>/g SV; Comercial 41.56mL CH<sub>4</sub>/g SV; Hotelera 9.6mL CH<sub>4</sub>/g SV.

El comportamiento de PBM fue diferenciado para los ensayos de los BioAR de las actividades económicas estudiadas durante los seis meses de monitoreo. En el caso de la actividad hotelera el PBM resultó ser el más bajo durante el período de medición del ensayo de digestividad (Figura 3c). Solo en el mes de enero de 2019 logró un valor mayor de 9.6mL CH<sub>4</sub>/g SV; los demás valores estuvieron por debajo de 6mL CH<sub>4</sub>/g SV.

Las condiciones de poca producción de metano en los ensayos de BioAR de actividad hotelera, se asocia al bajo contenido de sólidos volátiles; ya que en hoteles los principales contaminantes de las aguas se encuentran en lo detergentes de baja calidad (alto contenido de sulfatos), las grasas y aceites que se recogen de las cocinas, duchas y áreas de limpieza y por supuesto de las aguas residuales domésticas [19]. En consecuencia, se puede inferir que, debido a la poca materia orgánica en los BioAR de la actividad hotelera, por sí mismo no tiene la carga orgánica suficiente disponible para la digestión.

En tanto, para los ensayos con BioAR de la actividad avícola, los valores obtenidos reflejan congruencia con lo señalado en la literatura, en el sentido que son ricos en grasas y proteínas; lo que facilitaría una mayor formación de biogás. Sin embargo, al ser restos muy grasos el proceso se inhibe, porque son limitados los tipos de microorganismos capaces de metabolizarlos [20]. Esto se refleja en el comportamiento registrado en el ensayo (Figura 3a), para los meses de febrero y marzo de 2019, donde el valor máximo de PBM (4.2mL CH<sub>4</sub>/g SV), se estabilizó a las 720h del ensayo siendo similar en varios meses de los ensayos de digestividad con BioAR de actividad hotelera (figura 3c).

Los valores obtenidos de BioAR de la actividad comercial se asemejan a BioAR generados de actividades

domésticas, ya que mayormente sus aguas provienen de oficinas y locales comerciales de venta al detal (Tabla 3). Además, no se registraron valores inhibidores por metales pesados (tabla 4). Sin embargo, los valores registrados están muy por debajo de valores reportados de BioAR primarios (190mL CH<sub>4</sub>/g SV) [21].

A pesar de que en los BioAR estudiados de las actividades comercial y hotelera mantienen condiciones muy similares y que estaban ausentes de condiciones agresivas que pudieran afectar el crecimiento bacteriano (tabla 2 y 3), los valores de PBM fueron muy bajos los registros obtenidos en la biometanización derivado de la digestión anaeróbica (figura 3b y 3c). Sin embargo, el PBM de BioAR hotelero fue menor en comparación con la actividad comercial. En este caso se infiere que se debe a lo indicado previamente, el alto contenido de sulfatos.

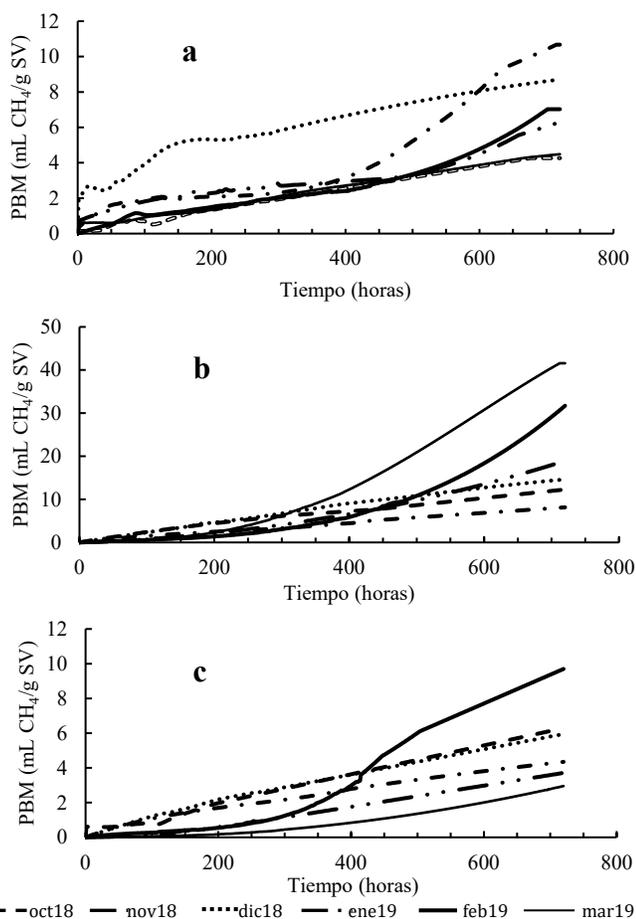


Figura 3. Potencial Bioquímico de Metano estimado para cada actividad económica, en base a los valores de presión registrados de los ensayos de digestión anaeróbica de BioAR: a) Avícola; b) Comercial y c) Hotelera.

### 3.3 Tasas de digestividad de BioAR

Con las curvas de PBM para cada actividad económica se estimaron las tasas de digestividad de los BioAR (tabla 4). Dado el comportamiento de los resultados (figura 3), se aplicó linealización.

Tabla 4. Tasas de Digestividad por Actividad Económica

Actividad Económica	Periodo de Análisis					
	2018			2019		
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
	K (d <sup>-1</sup> )					
Avícola	0.125	0.112	0.205	0.314	0.144	0.157
Comercial	0.357	0.542	0.467	0.200	0.842	0.607
Hotelera	0.167	0.102	0.173	0.146	0.232	0.038

Los resultados de las tasas de digestividad variaron poco entre meses para la actividad avícola. Esto puede asociarse a que es una actividad industrial donde se tiene un control de la cantidad de aves que son sacrificados. Sólo hubo una variación importante en el mes de enero de 2019 que fue el más elevado (tabla 5). Para esta actividad la tasa de digestividad estuvo en promedio 0.184 d<sup>-1</sup>. De igual forma, las tasas de la actividad hotelera se mantuvieron cercanos durante los seis meses de monitoreo con un valor promedio de fue 0.1382 d<sup>-1</sup>. En tanto, para los BioAR de la actividad comercial tuvo una tasa promedio de 0.5216 d<sup>-1</sup>. Estos resultados están en los rangos indicados en la literatura para lodos secundarios [22].

### 3.4 Análisis estadístico de los resultados de PBM

El ANOVA de una vía o con un factor, es el tipo de análisis que se emplea cuando los datos no están pareados y se quiere estudiar si existen diferencias significativas entre las medias de una variable aleatoria continua (producción de metano en mL CH<sub>4</sub>/ gr SV) en los diferentes niveles de otra variable cualitativa o factor (actividad que procesa la PTAR: comercial, avícola y hotelera). Es una extensión de los t-test independientes para más de dos grupos.

Las hipótesis contrastadas en esta investigación fueron:

H0: No hay diferencias entre las medias de los diferentes grupos:  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

H1: Al menos un par de medias son significativamente distintas la una de la otra.

El funcionamiento básico de un ANOVA consiste en calcular la media de cada uno de los grupos para luego

comparar la varianza de estas medias (varianza explicada por la variable grupo, entre grupos) frente a la varianza promedio dentro de los grupos (la no explicada por la variable grupo, dentro de grupos) [23].

La representación gráfica más útil antes de realizar un ANOVA es el modelo Box-Plot (figura 4). Este tipo de representación permite identificar de forma preliminar si existen asimetrías, datos atípicos o diferencia de varianzas. En este caso, los 3 grupos parecen seguir una distribución simétrica. En el ensayo de BioAR de la actividad Comercial se detecta un valor extremo que habrá que estudiar con detalle por si fuese necesario eliminarlo. El tamaño de las cajas es similar para todas las actividades (Avícola, Comercial y Hotelero) por lo que no hay indicios de falta de homocedasticidad.

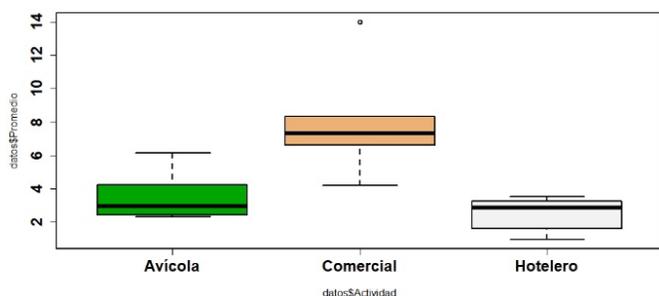


Figura 4. Gráfico de cajas de la producción de metano para actividades avícola, comercial y hotelera

El ANOVA se realizó utilizando el Software Estadístico R y se obtuvieron los resultados presentados a continuación (tabla 5):

Tabla 5. Resultados de ANOVA de producción de metano para actividades avícola, comercial y hotelera

	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Error cuadrático medio	F	p-valor
Actividad	2	101.4	50.7	10.79	0.00125**
Residuos	15	70.5	4.7		

\*\*p-valor<0.001

Dado que el p-valor es inferior a 0.05 hay evidencias significativas para considerar que al menos dos medias son distintas (Se rechaza H0). La representación gráfica de los residuos muestra una falta de homocedasticidad (Figura 5a) y en el qqplot los residuos se distribuyen muy cercanos a la línea de la normal (figura 5b).

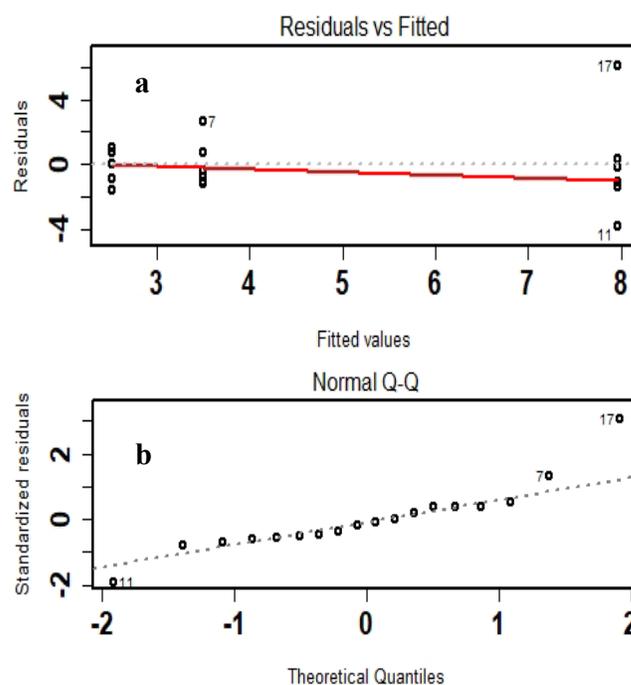


Figura 5. a) Gráfico de Residuos Vs Valores ajustado y b) Gráfico qqplot.

En este caso el ANOVA ha resultado significativo por lo que se procedió a realizar comparaciones entre las actividades (tabla 6). De entre los diferentes métodos de comparaciones múltiples y correcciones, se utilizó TukeyHSD.

Tabla 6. Resultados de la prueba TukeyHSD para la producción de metano de actividades avícola, comercial y hotelera.

Comparaciones	Diferencia* (ml CH <sub>4</sub> /g SV)	Inferior	Superior	p valor
Comercial - Avícola	4.4680818	1.216911	7.719253	0.0074034
Hotelero - Avícola	-0.9876368	-4.238808	2.263534	0.7152125
Hotelero - Comercial	-5.4557187	-8.706890	-2.204548	0.0015310

\*Diferencia de producción de metano entre cada actividad.

El intervalo de confianza para la diferencia entre las medias de Comercial-Avícola es de 1.21 a 7.72 y para hotelero-comercial es de -5.46 a 8.71. En ambos rangos no incluyen el cero, lo que indica que la diferencia es estadísticamente significativa (figura 6). El intervalo de confianza del par de media hotelero-avícola incluyen el cero, lo que indica que las diferencias no son estadísticamente significativas.

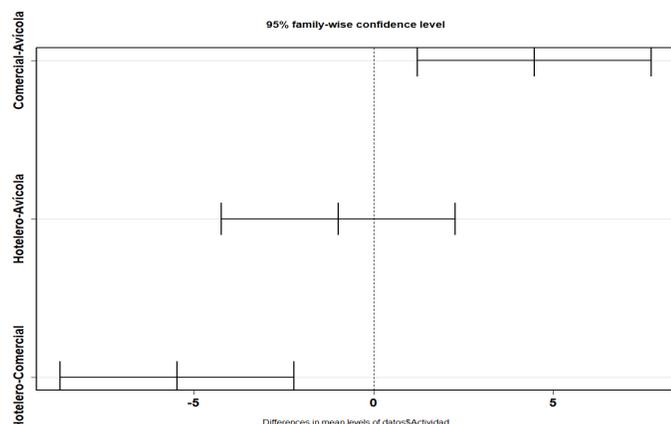


Figura 6. Diferencias en los niveles de las medias por actividad económica (TukeyHSD)

## 4. Conclusiones

El uso del Sistema Oxitop en su modo de registro manométrico, es decir, de mediciones de presiones internas, permitió evaluar exitosamente el comportamiento de la digestión anaeróbica de los biosólidos de las diferentes actividades económicas. Este método es muy útil, porque se remueve el CO<sub>2</sub> generado en la digestión anaeróbica, permitiendo registrar la presión neta producida por el gas metano.

Si bien es cierto que cada BioAR, independientemente de la actividad produce metano, su rendimiento dependerá de factores asociados a los contenidos de Sólidos Volátiles, alto contenido de grasas o sustancias surfactantes y altas relaciones C/N. Adicional se deben considerar otras variables como edad de los lodos, ya que un lodo maduro o en proceso de estabilización tendrán diferentes rendimientos.

Es necesario continuar explorando los BioAR de otras actividades económicas, en especial de actividades económicas como las industrias alimenticias; las cuales producen altos contenidos de materia orgánica. Además, es necesario explorar la alternativa de la adición de otros sustratos con alto contenido de materia orgánica y nitrógeno; de forma tal, de generar las condiciones favorables para que los microorganismos mejoren los rendimientos en la producción de biogás.

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos a la SENACYT por el financiamiento del proyecto IDDS15-071 “Evaluación del aprovechamiento de lodos orgánicos de sistemas de tratamiento de aguas residuales en Panamá”, del cual se

desprende este artículo. Además, agradecemos a la Universidad Tecnológica de Panamá por el permanente e incondicional apoyo que nos brinda.

## REFERENCIAS

- [1] IDAE. 2011. Situación y potencial de generación de biogás. Estudios Técnicos PER 2011-2020.
- [2] USDA, EPA, & DOE. 2014. Biogas Opportunities Roadmap. Washington, D.C.
- [3] Rojas, R.; Mendoza, L. G. 2011. Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. Producción + Limpia - Julio - Diciembre de 2012. Vol.7, No.2 – 74-94
- [4] Ministerio de Economía y Finanzas. Informe Economico y Social Anual 2017, pág 87.
- [5] Planta de tratamiento de lodos y parque eco-industrial en el Relleno Sanitario de Cerro Patacón. Energaseo, S.A. 2016.
- [6] Garrido, E.(1 de abril de 2018). Relleno de Cerro Patacon, área destinada para los residuos de la planta de tratamiento de Juan Díaz. Capital Financiero. Recuperado de: <https://elcapitalfinanciero.com/relleno-del-cerro-patacon-area-destinada-para-los-residuos-de-la-planta-de-tratamiento-de-juan-diaz/>
- [7] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019
- [8] Ley 45. Que establece un régimen de incentivos para el fomento de sistemas de generación hidroeléctrica y de otras fuentes nuevas, renovables y limpias y dicta otras disposiciones, 45 C.F.R. (2004).
- [9] SNE. Plan Nacional de Energía. Panamá. (2016).
- [10] Castillo, J., & Murillo C. “Línea base y diagnóstico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales basado en los principales sectores económicos de las provincias de Panamá y Coclé”. Tesis de Pregrado. Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá. (2018).
- [11] COPANIT 47-2000. Agua. Uso y disposición final de lodos (2000).
- [12] Caldera Y., & Gutierrez E., “Aguas residuales de un matadero de aves: Características y tratamiento”, vol. II N°3, Intellectus, 2012, pág. 7.
- [13] APHA, AWWA, and WEF, Standar Methods for The Examination of Water And Wastewater. 21 ed, ed. A.D. Eaton, et al. 2005, Baltimore, Meryland.
- [14] EPA 200.7 (1982). Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.
- [15] WTW, M. S. (1998). Operating Manual. Systemen OxiTop® Control Germany
- [16] Ortiz J. Puesta a punto de una metodología para la determinación de la actividad metanogénica específica de un fango anaerobio mediante el sistema OxiTop®. Influencia de las principales variables experimentales (Tesis doctoral). Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia; 2011, págs 58-62.
- [17] Aquino, S. F., Chernicharo, L. C. A., Foresti, E. & Florencio, D. S. M. D. L. (2007). Metodologias Para Determinação Da Atividade Metanogênica Específica (Ame) Em Lodos Anaeróbios. Eng. Sanit. Ambient., pág. 199.

- [18] Giménez, J. B., Martí, N., Ferrer, J. & Seco, A. (2012). Methane Recovery Efficiency In A Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor (Sanmbr) Treating Sulphate-Rich Urban Wastewater: Evaluation Of Methane Losses With The Effluent. *Bioresoruce Technology*, pág 7-10.
- [19] León, León (13 de septiembre de 2007). Una investigadora de la Universidad de León estudia las mejores formas de obtener biogás a partir de residuos de matadero. DICYT.
- [20] Consuelo, I. & Guerrero, J. (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la co-digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos. Tesis de maestría. Universidad de Antioquía.
- [21] S. Luostarinen, S. Luste, and M. Sillanpää. (2009). "Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant," *Bioresource Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 79–85.
- [22] Ghosh, S. 1981 Kinetic of acid-phase fermentation in anaerobic digestion. *Biotechnol. Bioeng. Symp.* 11, 301-313.
- [23] Joaquín Amat Rodrigo, ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias, 2016. [En línea]. Disponible en: [https://rpubs.com/Joaquin\\_AR/219148](https://rpubs.com/Joaquin_AR/219148). [Accedido: 28-ago-2019]