

Evaluación del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano

Luis Eduardo Yepez Matute

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2017

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Evaluación del incremento de temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Luis Eduardo Yepez Matute

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2017

Evaluación del incremento de temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano

Luis Eduardo Yepez Matute

Resumen. El aumento en la producción de alimentos y el crecimiento de la producción avícola tienen una relación directa con la generación de desechos orgánicos que provocan impactos ambientales debido a un mal manejo. La digestión anaeróbica se presenta como una solución para la gestión de estos residuos obteniendo beneficios como la producción de energía y fertilizantes. El presente estudio evalúa el efecto del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass (K) y gallinaza (G) por separado y en codigestión, con proporciones de 50:50 y 70:30, respectivamente. Se registró la producción de CH₄ utilizando reactores batch con una carga orgánica de 1 kg SV/m³. El ensayo se realizó en rango mesófilo (35 °C) y termófilo (45 °C). Los resultados mostraron que el incremento en temperatura no contribuyó al aumento en la productividad de metano o a la reducción del TRH. Los mejores desempeños se registraron en el tratamiento individual del King Grass, con una productividad de CH₄ de 0.441 m³/kg SV en los reactores mesófilos y 0.323 m³/kg SV en los reactores termófilos. La codigestión que registró mejor desempeño fue la de 50G – 50K presentando una productividad de CH₄ (0.406 m³/kg SV) en el rango mesófilo y en el rango termófilo (0.275 m³/kg SV). Como solución ambiental a la problemática de la gallinaza, la codigestión 70G – 30K representa la mejor alternativa.

Palabras clave: Biogás, Codigestión, productividad de metano, biodegradabilidad, termofílico.

Abstract. The increase in food and poultry production is directly related to the production of organic waste that affects the environment due to inefficient disposal. Anaerobic digestion is a feasible waste management solution for these type of wastes, obtaining benefits such as clean energy and organic fertilizers production. This study evaluates the effect of temperature increase in the anaerobic digestions of King Grass (K) and poultry manure (G) separately and in codigestion with 50:50 and 70:30 proportions. Batch reactors were set up at 1 kg SV/m³ of organic load for methane production record. The assay was performed at mesophilic (35 °C) and thermophilic (45 °C) temperatures. The results showed that the increase in temperature did not contribute to the increase in methane productivity or to the reduction of HRT. The best performance was recorded when treating King Grass separately with 0.441 kg SV/m³ methane production using mesophilic reactors and 0.323 kg SV/m³ with thermophilic reactors. The codigestion with better results was 50G – 50K which presented the best productivity results of CH₄ (0.406 m³/kg VS) in the mesophilic range and in the thermophilic range (0.275 m³/kg VS). As a solution to the environmental problematic of poultry manure, the 70G – 30K codigestion represents the best choice.

Key words: Biodegradability, biogas, codigestion, methane productivity, thermophilic.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA.....	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4. CONCLUSIONES.....	24
5. RECOMENDACIONES.....	25
6. LITERATURA CITADA.....	26
7. ANEXOS	29

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Análisis fisicoquímicos realizados a los sustratos	5
2. Análisis fisicoquímicos realizados a los efluentes.	5
3. Cantidad de sustrato usado en la digestión mesófila	7
4. Cantidad de sustrato usado en la digestión termófila	7
5. Características físico - químicas de los sustratos	12
6. Características físico - químicas de los efluentes mesófilos	13
7. Características físico - químicas de los efluentes termófilos.....	13
8. Tiempos de Retención al 85% de productividad de metano.	17
9. Test de normalidad Shapiro - Wilk	17
10. Significancia de las pruebas estadísticas	18
11. Prueba t - Student para productividad de metano.....	19
12. Prueba t - Student para TRH	20
13. Producción de metano a partir de SV removido.....	22
14. Producción de metano a partir de SV removido.....	22
Figuras	Página
1. Sistema utilizado para la recolección de gallinaza	4
2. Diseño experimental para los tratamientos en el rango mesófilo y termófilo	10
3. Producción de metano a partir de kg SV removido a temperatura mesófila	15
4. Índice de producción de metano a temperatura mesófila	16
5. Índice de producción de metano a temperatura termófila	16
6. Cuadro de cajas de productividad de metano en reactores mesófilos	18
7. Cuadro de cajas de productividad de metano en reactores termófilos.	19
8. Cuadro de Caja de TRH para reactores mesófilos.....	20
9. Cuadro de Caja de TRH para reactores termófilos.....	21
10. Porcentaje de remoción de SV a temperaturas mesófilas y termófilas.	23
Anexos	Página
11. Prueba DUNCAN de la productividad de metano en los reactores mesófilos	29
12. Prueba DUNCAN de la productividad de metano en los reactores termófilos ...	30

1. INTRODUCCIÓN

Año tras año la población mundial ha demandado mayor cantidad de alimentos. Como medida para satisfacer la demanda de alimentos a nivel mundial muchos sectores se han vuelto más eficientes. Este es el caso del sector agrícola y pecuario que han incrementado la producción y comercialización en las últimas décadas. La avicultura ha llegado a ser uno de los sectores con mayor crecimiento, posicionándose en países con diferentes ingresos económicos (FAO, 2013). Este rubro tiene dos enfoques los cuales son engorde y ponedoras que tienen como objetivo suplir de proteína animal al consumidor. En los países en vías de desarrollo el consumo de huevos de gallina se encuentra ligado estrictamente a la dieta diaria. El sector avícola vinculado a gallinas ponedoras ha tenido un gran avance, reportando que una gallina puede producir más de 300 huevos al año en comparación a varias décadas atrás donde solo se podía producir 60 huevos al año por gallina (FAO, 2010).

Para lograr eficiencia en el sector avícola de ponedoras, se ha procurado la optimización del espacio incrementando el número de aves por área. Esto también conduce a una mayor producción de residuos, donde uno de los principales se compone de la excreta denominada gallinaza. Riera et al., (2014) estiman que un ave excreta 120 g al día, 3.6 kg al mes y 43.20 kg al año y que su acumulación o incorrecto manejo ha provocado importantes impactos ambientales. El alto contenido de nutrientes del residuo ha provocado problemas en la calidad de agua, aire y suelo (Williams, 2013). Adicionalmente, se reporta la generación de otro tipo de residuos como la cáscara de huevo, bandeja de huevo, cadáveres y residuos convencionales propios de la administración, clasificación, desinfección, mantenimiento y vacunación (Muñoz, 2014).

La gallinaza es un residuo orgánico compuesto por una fracción sólida (heces) y una fracción líquida (orina). Al ser la gallinaza un residuo orgánico rico en nutrientes como el nitrógeno y fósforo, un nulo o mal manejo del residuo impacta en el ambiente negativamente. El elevado nivel de nitrógeno en la gallinaza se debe a la fracción de la excreta compuesta por ácidos úricos y elementos nitrogenados no proteicos (Bujoczek, Oleszkiewicz, Sparling y Cenkowski, 2000). Para el manejo de la gallinaza existen diferentes tratamientos, siendo la digestión anaerobia y el compostaje los más aceptados (Riera et al., 2014). Las ventajas de la digestión anaerobia ante el compostaje es la reducción de la carga orgánica del residuo, producción de energía y la obtención de un subproducto que puede ser utilizado como fertilizante (Williams, 2013).

La aplicación de soluciones ambientales para los residuos orgánicos ha logrado que la digestión anaeróbica se optimice, obteniendo reactores más eficientes que soportan cargas orgánicas más altas y una reducción en los tiempos de retención hidráulica (Yang et al.,

2015). La digestión anaeróbica es el proceso de degradación de moléculas orgánicas complejas a moléculas simples, como el metano y gas carbónico mediante microorganismo en un ambiente anaeróbico. Este proceso ocurre en diferentes fases con un pH diferente en cada una de ellas, este cambio de pH desestabiliza el proceso aumentando los tiempos de retención, debido a esto la población de microorganismos cambian de acuerdo a la fase en la que se encuentre el proceso (Elefsiniotis y Oldham, 1994). Las fases de la digestión anaeróbica son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénica, siendo la última fase donde se produce metano (Campos, 2001).

Los parámetros bioquímicos que pueden desestabilizar el proceso anaeróbico afectando directamente a los microorganismos son la relación C/N, temperatura y pH. La relación C/N en el proceso anaeróbico afecta los tiempos de retención y la producción de biogás, siendo la relación óptima de 30:1 (Soria et al., 2001). Una baja relación C/N puede producir un efecto inhibitorio de la digestión anaeróbica debido a la producción de amonio (Chen, Cheng y Creamer, 2007). Una alta proporción de nitrógeno incrementa el pH debido a la generación de altos niveles de amonio desestabilizando el proceso afectando directamente a los microorganismos metanogénicos (Wang et al., 2012). Chen y colaboradores (2007) reportan en su revisión de literatura que concentraciones mayores de 1.7 g/L a 14 g/L de amonio producen una reducción del 50% del proceso anaeróbico.

La gallinaza está compuesta por un elevado contenido de nitrógeno, el cual puede afectar el proceso de digestión anaerobia debido a la acción inhibitoria producida por el amonio. La gallinaza está compuesta por un 70% de orina y el 30% de heces, donde el ácido úrico representa el 62% del N total (Bujoczek, Oleszkiewicz, Sparling y Cenkowski, 2000). Para contrarrestar el efecto inhibitorio del amonio, diferentes autores recomiendan la dilución de los sólidos totales de la gallinaza desde un valor de 20 a 25%, hasta obtener sólidos totales entre el rango de 5 - 11.4%. Weerayuttil y colaboradores (2016) reportan en su estudio de codigestión con gallinaza y napier grass una productividad de metano para la gallinaza de 0.40 – 0.60 m³/kg SV.

La codigestión consiste en la combinación de sustratos con diferentes propiedades fisicoquímicas para obtener una mezcla final con características ideales para el desempeño del proceso anaeróbico. Este procedimiento permite obtener beneficios como mejora de la relación C/N, balance del pH de la mezcla, sólidos totales y sólidos volátiles para reducir el efecto de los factores inhibitorios en el proceso anaeróbico. La gallinaza presenta una relación baja de C/N y para lograr un balance es necesario un sustrato rico en carbono (Wang, Yang, Feng, Ren y Han, 2012). Existen diferentes residuos con una composición alta en carbono como King Grass, paja de trigo, suero de leche, entre otros (Gelegenis et al., 2007; Wang et al., 2012; Weerayuttil et al., 2016).

Gunaseelan (1997) en su revisión de literatura se refiere al King Grass y a otras gramíneas como cultivos utilizados en la digestión anaeróbica, debido a un alto potencial de producción de metano. El mismo autor en su estudio de biomasa determinó una producción de metano de 0.342 m³/kg SV añadido en el sistema para la variedad de King Grass napier grass. Weerayuttil y colaboradores (2016) determinaron que el King Grass tiene una relación C/N de 39.35, característica que lo convierte en un sustrato ideal para realizar

codigestión con sustratos ricos en nitrógeno. Sin embargo, la producción de metano del King Grass se ve afectada por diferentes factores como la edad, la parte de la planta usada, la frecuencia de cosecha, la variedad del cultivo, el tamaño de la partícula, la adición de nutrientes o uso de pretatamientos en el sistema anaeróbico, entre otros.

La edad del King Grass determina la lignificación del tejido en la planta, lo cual impacta en la producción de metano. Plantas con menor edad tienen una mayor producción de metano que plantas con mayor edad, esto se debe a una mayor concentración de lignina en el tejido de plantas con una edad mayor (Gunaseelan, 1997). El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina del King Grass impacta en los tiempos de retención requeridos durante la digestión anaeróbica. La literatura reporta que la variedad napier grass tiene una concentración de lignina, celulosa y hemicelulosa de 111.8, 420.8 y 195.5 g/kg en materia seca. La difícil degradabilidad del King Grass se debe a una lenta hidrólisis, esta se puede mejorar aplicando pretratamientos (Rekha y Aniruddha, 2013).

El aumento de temperatura en el proceso anaeróbico, produce un aumento en la velocidad de las reacciones químicas (Soria et al., 2001). El aumento en la velocidad de degradación de la materia orgánica se presenta como una alternativa para sustratos con estructura compleja como los lignocelulósicos (Rekha y Aniruddha, 2013). Por otro lado, el aumento de temperatura también puede producir un efecto inhibitorio al proceso anaeróbico, principalmente con sustratos ricos en nitrógeno donde se generan compuestos como el amonio (NH_4) y nitrógeno amoniacal (NH_3) (Acosta et al., 2005).

Por otra parte, Flotats y Colaboradores (1999) detallan en su estudio que al aumentar la temperatura se incrementa la velocidad de degradación del nitrógeno orgánico provocando concentraciones altas de amonio. Los rangos de temperaturas termófilas favorecen los tiempos de retención con una mayor degradación de la materia orgánica y producción de ácidos orgánicos volátiles para obtener una mayor productividad de metano.

Con el fin de proponer la implementación de la digestión anaerobia como alternativa de manejo de residuos de gallinaza, se escogió el King Grass como sustrato de codigestión para esta investigación, determinando el efecto de la combinación de diferentes proporciones de estos y utilizando dos rangos de temperatura para la evaluación de la eficiencia del proceso anaerobio y su productividad de metano. Se plantean los siguientes objetivos para el desarrollo del estudio:

- Determinar la combinación de sustratos que conduce a una mayor productividad de metano aplicando un sistema de digestión anaerobia en reactores batch.
- Evaluar la influencia del incremento de la temperatura en la productividad de metano y la reducción del tiempo de retención del proceso de tratamiento.
- Evaluar el impacto de la codigestión y el incremento de temperatura en la eficiencia de remoción de la carga orgánica en reactores batch.

2. METODOLOGÍA

Recolección y cuantificación de muestras e inóculos.

Para llevar a cabo el estudio se recolectó las muestras de gallinaza en la unidad avícola de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, en el departamento de Francisco Morazán, Honduras. Esta unidad cuenta con aproximadamente 1,000 ponedoras en producción y con una capacidad para 9,072 pollos de engorde aproximadamente. Las excretas de las aves caen directamente a una fosa donde se acumula, la limpieza de la fosa se realiza dos veces al año. Para el estudio se monitorearon seis jaulas con siete aves cada una (Figura 1), cada jaula contó con una plancha para la recolección de la gallinaza. Las aves fueron seleccionadas al azar.



Figura 1. Sistema utilizado para la recolección de gallinaza.

La toma de muestras se realizó diariamente por cinco días en la última semana del mes de mayo, se registró la producción de excretas y el consumo de alimento por jaula. La recolección y alimentación se llevó a cabo al medio día, la cantidad recolectada diariamente fue de 1 kg. Se recolectó en frasco herméticamente cerrados, posteriormente a la recolección se trasladaron las muestras al laboratorio de Bioenergía en el departamento de Ambiente y Desarrollo para ser almacenadas a 4 °C.

Las muestras de King Grass usadas para el estudio fueron recolectadas en las plantaciones de la empresa Honduras Green Power Corporation S. A. en Choloma, departamento de Cortés, Honduras. La edad del cultivo fue de 60 días al momento de la corta. La muestra fue pesada en materia fresca y posteriormente fraccionada en hojas y tallos, cuantificando

el peso de cada porción fue pesada para determinar la proporción de hojas y tallo del King Grass.

Las muestras fraccionadas fueron secadas al sol durante 6 horas diarias por tres días. Cada fracción fue picada para reducir el tamaño de partícula hasta 1 cm aproximadamente. De acuerdo a Gunaseelan (1997) la reducción del tamaño de partícula del King Grass beneficia la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos. Las muestras secadas y picadas se almacenaron en bolsas herméticas a temperatura ambiente en un lugar seco.

Finalmente, el inóculo requerido en el arranque de los reactores batch fue recolectado en la unidad porcina de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, en el departamento de Francisco Morazán, Honduras. El inóculo se tomó directamente del digestor anaeróbico usado en la granja porcina, fue almacenado en un recipiente de un galón a temperatura ambiental.

Caracterización de parámetros fisicoquímicos de los sustratos e inóculo.

Las muestras recolectadas luego de su almacenamiento y conservación, fueron sometidas a análisis de parámetros fisicoquímicos (Cuadro 1). La caracterización de las muestras se realizó de forma individual. Para evaluar el proceso se la digestión anaeróbica, se analizaron los parámetros fisicoquímicos de los efluentes finales de cada tratamiento de los reactores batch (Cuadro 2). Cada efluente fue preservado con H₂SO₄ concentrado y luego conservado a 4 °C.

Cuadro 1. Análisis fisicoquímicos realizados a los sustratos.

Parámetro	Método	Referencia
pH	4500 - H ⁺	APHA 2012
Sólidos Total	2540B	APHA 2012
Sólidos Volátiles	2540E	APHA 2012
Nitrógeno Total Kjeldahl	4500 N _{org} C	APHA 2005
Carbono Total		Adams et al. 1951

Cuadro 2. Análisis fisicoquímicos realizados a los efluentes.

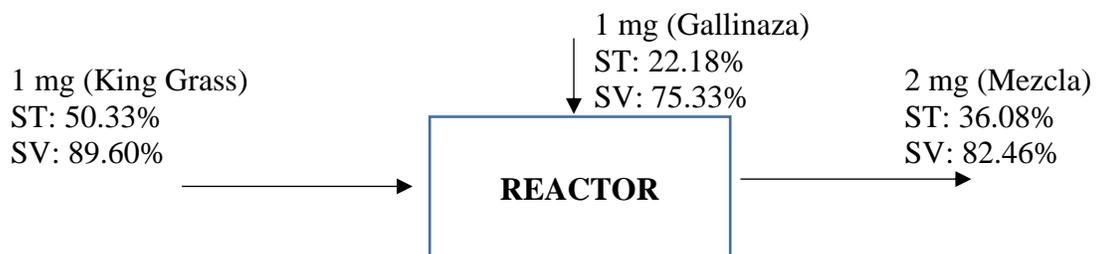
Parámetro	Método	Referencia
pH	4500 – H ⁺	APHA 2012
Sólidos Total	2540B	APHA 2012
Sólidos Volátiles	2540E	APHA 2012
Nitrógeno Amoniacal	4500 N _{org} C	APHA 2005

Montaje de reactores y tratamientos.

Cada tratamiento evaluado mediante la codigestión anaeróbica, se llevó a cabo en reactores batch con alimentación única. Los reactores son frascos de vidrio de 250 mL y 150 mL sellados herméticamente, conformados por una fracción líquida de 200 mL y 100 mL dependiendo del reactor y la fracción restante para almacenamiento de gases. Para el montaje de cada tratamiento se adaptó la metodología usado por Angelidaki y colaboradores (2009) aplicando un carga de 1 kg SV/m³.

Para llevar a cabo la evaluación de la digestión anaeróbica del King Grass y gallinaza se montaron tratamientos individuales y con diferentes proporciones de mezcla. Los tratamientos fueron: 100% gallinaza (100 G), 100% hojas de King Grass (100 KH), 100% King Grass (100 K), 50% gallinaza - 50% King Grass solo hojas (50 G - 50 KH), 50% gallinaza - 50% King Grass (50 G - 50 K), 70% gallinaza - 30% hojas de King Grass (70 G - 30 KH) y 70% gallinaza - 30% King Grass (70 G - 30 K). Los tratamientos en reactores batch de 250 mL fueron evaluados a temperatura mesófila (35 °C ± 2) y los tratamientos en los reactores de 150 mL fueron evaluados a temperatura termófila (45 °C ± 2).

Para lograr una carga orgánica de 1 kg SV/m³ se caracterizó cada sustrato (Cuadro 5). Se determinó la cantidad de sustrato en mg de materia cruda para cada tratamiento mediante la cantidad de sólidos volátiles (SV) presentes en la gallinaza y King Grass. Se llevó a cabo un balance de masa para determinar los SV de la mezcla [1], a partir del balance se realizó estequiometría para determinar los mg de materia cruda para lograr los SV de la mezcla (Cuadro 3 y 4) [2] y [3].



$$G + K = M \quad [1]$$

$$\frac{1 \text{ mg SV}}{\text{mL}} \times 200 \text{ mL} \times \frac{100 \text{ mg ST M}}{82.46 \text{ mg SV}} \times \frac{1 \text{ mg ST G}}{2 \text{ mg ST M}} \times \frac{100 \text{ mg G}}{22.8 \text{ mg ST G}} = 546.62 \text{ mg G} \quad [2]$$

$$\frac{1 \text{ mg SV}}{\text{mL}} \times 200 \text{ mL} \times \frac{100 \text{ mg ST M}}{82.46 \text{ mg SV}} \times \frac{1 \text{ mg ST K}}{2 \text{ mg ST M}} \times \frac{100 \text{ mg K}}{50.33 \text{ mg ST K}} = 546.62 \text{ mg K} \quad [3]$$

Cuadro 3. Cantidad de sustrato usado en la digestión mesófila.

Muestra	Número de Reactores	Reactor (mL)	Carga (kg SV/m ³)	Gallinaza (mg)	King Grass	
					Tallo (mg)	Hoja (mg)
100 G	3	200	1	1197.02	ND	ND
100 KH	3	200	1	ND	ND	292.40
100 K	3	200	1	ND	270.40	172.90
50 G - 50 K	3	200	1	546.63	146.90	93.95
50 G - 50 KH	3	200	1	545.17	ND	159.23
70 G - 30 KH	3	200	1	792.76	91.30	58.40
70 G - 30 K	3	200	1	791.47	ND	99.07

Donde:

G: Gallinaza

KH: King Grass solo hojas

K: King Grass

ND: No determinado

Cuadro 4. Cantidad de sustrato usado en la digestión termófila.

Muestra	Número de Reactores	Reactor (mL)	Carga (kg SV/m ³)	Gallinaza (mg)	King Grass	
					Tallo (mg)	Hoja (mg)
100 G	3	100	1	598.51	ND	ND
100 KH	3	100	1	ND	ND	146.20
100 K	3	100	1	ND	135.20	86.45
50 G - 50 K	3	100	1	273.32	73.50	46.98
50 G - 50 KH	3	100	1	272.59	ND	79.62
70 G - 30 KH	3	100	1	396.38	43.70	29.20
70 G - 30 K	3	100	1	595.74	ND	49.54

Donde:

G: Gallinaza

KH: King Grass solo hojas

K: King Grass

ND: No determinado

Para los reactores batch de 250 mL se preparó una solución de 100 mL con el sustrato y agua destilada, adicionalmente se agregó 100 mL de biol o inóculo, para llegar a un volumen total de 200 mL. Por otro lado para los reactores batch de 150 mL se preparó una solución de 50 mL de sustrato y agua destilada, adicionalmente se agregó 50 mL de biol o inóculo, para llegar a un volumen total de 100 mL. Para cada tratamiento se montaron tres réplicas idénticas. Para corregir el aporte de metano por parte del biol o inóculo en cada tratamiento, se montaron dos blancos para cada tipo de reactor. Para los reactores de 250 mL se diluyó 100 mL de biol o inóculo en 100 mL de agua destilada sin sustratos. Para los reactores de 150 mL se diluyó 50 mL de biol o inóculo en 50 mL de agua destilada. Para

llevar un seguimiento del proceso anaeróbico se utilizó un reactor control, con dextrosa como sustrato estándar que permite verificar la viabilidad del inóculo. Para finalizar el montaje los reactores se sellaron herméticamente y se agitaron para iniciar el proceso de incubación.

Lecturas de metano.

La medición de metano en los reactores mesófilos ($35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$) empezó al día 4 después del montaje. Seguidamente se realizó el registro de la producción de gas en intervalos de 3 días. Para los reactores termófilos ($45\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$) la medición de acumulación de metano se realizó en intervalos de 1 día. Para la medición de metano se utilizó una adaptación del método de desplazamiento de líquidos de Wilkie et al. (2004) mediante una solución alcalina de KOH para captar el CO_2 y el CH_4 al ser insoluble en el medio alcalino desplaza un volumen equivalente al volumen de CH_4 . Para contabilizar el volumen desplazado se utilizó una bureta conectada al sistema.

Las lecturas de metano se realizaron hasta que la producción de gas se detuvo. A partir de estos datos de producción se determinaron los tiempos de retención hidráulica. Con la producción del blanco se realizaron correcciones de metano debido al aporte de metano por parte del inóculo en cada tratamiento. En cada medición se reportaron datos de presión atmosférica y temperatura, con la finalidad de realizar una corrección de la producción de metano a condiciones normales se utilizó la siguiente formula [4].

$$V = \frac{V_m \times P_m \times T}{P \times T_m} \quad [4]$$

Donde:

V = Volumen de CH_4 corregido a condiciones normales (mL)

V_m = Volumen de CH_4 a condiciones ambientales (mL)

P_m = Presión a nivel del mar (mm Hg)

T = Temperatura a condiciones normales ($^{\circ}\text{K}$)

P = Presión a condiciones normales (mm Hg)

T_m = Temperatura ambiental ($^{\circ}\text{K}$)

Para cada tratamiento sometido a diferente rango de temperatura se evaluó a una carga orgánica de 1 kg SV/m^3 . Para obtener un dato cuantitativo de la producción de metano generado se utilizó el índice de producción de metano (IPM) [5], que corresponde a los mL de metano producidos por cada mg de SV introducido a los reactores batch.

$$\text{IPM (mL CH}_4\text{/ g SV)} = \frac{\text{Volumen CH}_4\text{(mL)}}{\text{Carga orgánica} \left(\frac{\text{g SV}}{\text{L}} \right) \times \text{Volumen de solución (L)}} \quad [5]$$

Eficiencia de remoción de sólidos.

Los sustratos fueron caracterizados antes de la digestión anaeróbica y luego de culminar el proceso de la misma. La eficiencia de remoción de sólidos se obtuvo en términos de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) [6] y [7].

$$\text{Eficiencia de remoción de ST (\%)} = \frac{\text{ST iniciales (g)} - \text{ST finales (g)}}{\text{ST iniciales (g)}} \quad [6]$$

$$\text{Eficiencia de remoción de SV (\%)} = \frac{\text{SV iniciales (g)} - \text{SV finales (g)}}{\text{SV iniciales (g)}} \quad [7]$$

Diseño experimental y análisis estadístico.

El diseño experimental consto de dos factores (temperaturas y tratamientos) y dos variables de respuesta (producción de CH₄ y TRH). Cada tratamiento constó de tres réplicas para el desarrollo de los análisis estadísticos. Se determinó la normalidad de los resultados de producción de CH₄ y TRH mediante la prueba Shapiro Wilk. Para determinar si existe diferencia entre la productividad de metano de los tratamientos a una misma temperatura se utilizó un ANOVA.

Para saber cuál tratamiento proporcionó el mejor rendimiento estadísticamente se utilizó una prueba DUNCAN. Para determinar si existe una diferencia estadística entre la producción de metano de un mismo tratamiento a diferentes temperaturas se utilizó la prueba t - Student. Por ultimo para determinar estadísticamente existe una diferencia estadística entre los TRH de un mismo tratamiento en diferentes temperaturas se utilizó la prueba t - Student. Los datos se analizaron con un $p \leq 0.05$ en el paquete estadístico "IBM SPSS Statistics 19".

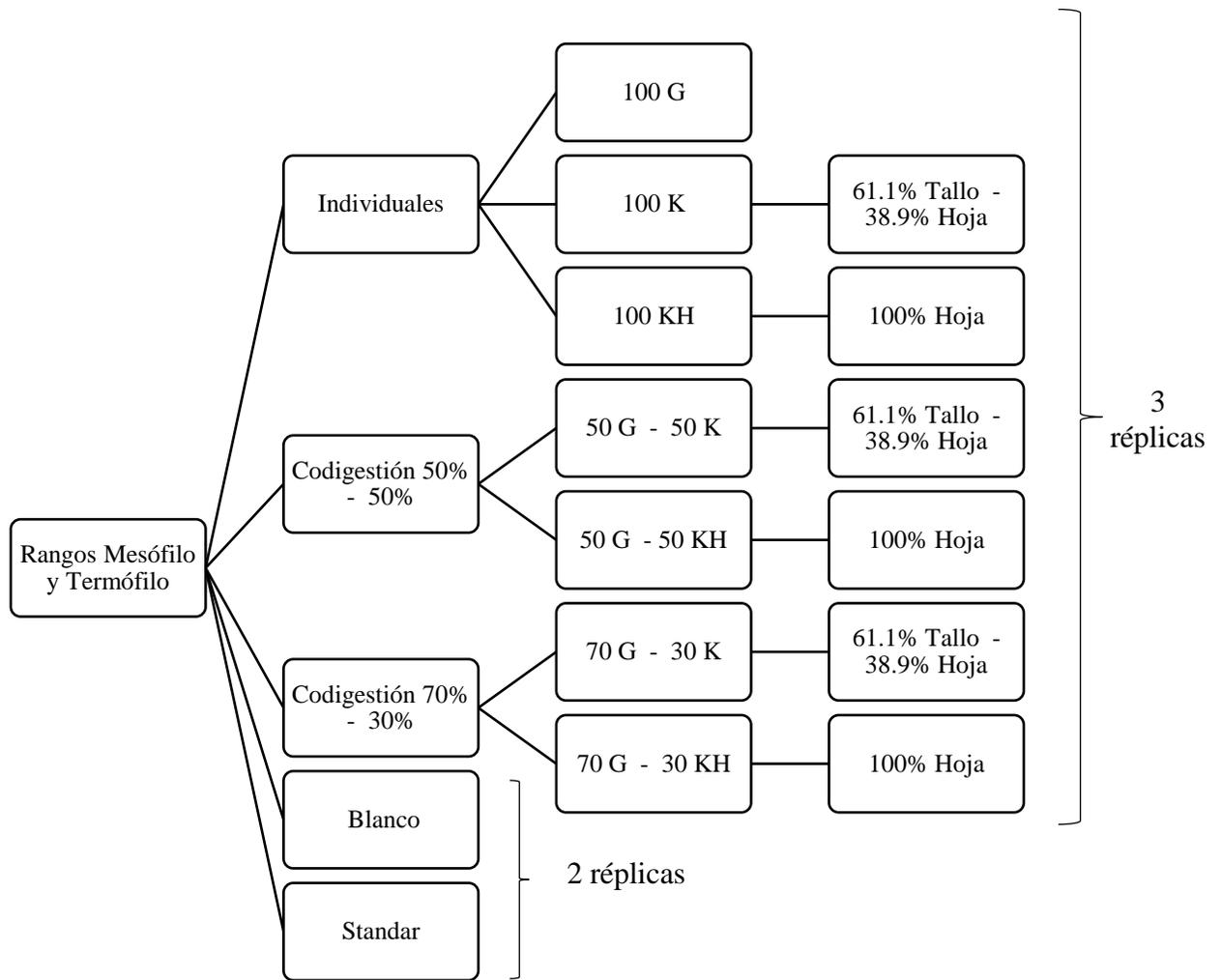


Figura 2. Diseño experimental para los tratamientos en el rango mesófilo y termófilo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación y caracterización de los sustratos.

En el monitoreo del consumo y excreta producido por la granja avícola de Zamorano se obtuvo un promedio de excreta de 0.099 kg y un promedio de consumo de 0.086 kg por ave. El promedio de excreta es mayor que el promedio de consumo ya que se considera como excreta a la mezcla de orina y heces del ave (Bujoczek, Oleszkiewicz, Sparling y Cenkowski, 2000). Para establecer un balance de materia se debe considerar el agua que consume el animal.

Con estos datos se obtuvo una relación excreta: consumo de 1.19, esto quiere decir que por cada kg consumido de alimento una unidad animal produce 1.19 kg de excreta. Riera et al. (2014) estima que una granja de ponedoras de 100000 aves logra producir 12 toneladas de gallinaza al día, lo que equivale a 0.120 kg de gallinaza al día por ave. FAO (2013) en su estudio de características de la gallinaza en aves de corral estima que una ponedora en su ciclo de producción puede excretar 0.120 kg al día, las diferencias de producción de excreta cambian de acuerdo a la genética, salud del ave, alimento y prácticas de producción.

Al separar la muestra de King Grass en hoja y tallo se obtuvieron porcentajes promedios de 61.10% para tallo y 38.90% para hoja, que corresponde a una relación hoja:tallo de 0.64 para un King Grass de 60 días. Araya y Boschini (2005) en su estudio de pastos determina para un King Grass de 70 días una relación hoja:tallo de 0.59 en materia fresca. Estos autores dicen que a mayor edad la relación hoja:tallo es menor, esto explica porque la relación tallo:hoja del King Grass de 60 días es mayor a un King Grass de 70 días.

Los resultados de la caracterización de los sustratos se presentan en el Cuadro 5. El porcentaje de (SV/ST) del King Grass fue de 89.60%, este valor se acerca al porcentaje de (SV/ST) de napier grass que fue de 83.5% obtenido por Rekha y Aniruddha (2013) en su estudio. Araya y Boschini (2005) en su estudio reportan un descenso de cenizas a mayor edad de corte; las varianzas de (SV) se pueden deber a las diferentes edades de corte del King Grass.

El porcentaje de (SV/ST) obtenido de la gallinaza fue de 75.3%, en comparación con otros estudios los porcentajes de (SV/ST) obtenidos fueron 64.13% y 74.60% (Weerayuttil, Khoyum y Khuanmar, 2016; Borowski y Weatherley, 2013). El alto contenido de materia orgánica volátil de la gallinaza se debe a composición química, la cual tiene un 20.5% de proteína, 20% de celulosa, 1.6% lignina, 23.2% hemicelulosa y 0.3% de ácidos grasos (Marin-Batista, Castro y Escalante, 2015).

Para determinar la relación C/N de cada sustrato se estimó el porcentaje de carbono total (CT%) y el porcentaje de nitrógeno total (NT%) en los sustratos seleccionados. Se obtuvieron valores de CT de 41.85 y 49.78% para la gallinaza y para King Grass respectivamente. El valor obtenido de nitrógeno total para gallinaza fue mayor que el valor de King Grass. Esto se debe a la composición química de la gallinaza la cual es rica en N debido a que la excreta está compuesta por ácidos úricos y compuestos nitrogenados no proteicos, los ácidos úricos contienen aproximadamente un 88% de orina los cuales aportan el 62% de NT en la gallinaza (Bujoczek et al., 2000).

El valor obtenido de nitrógeno en el estudio fue de 2.02% el cual es menor al valor de 3.8% de N que reporta Marín - Batista, Castro y Escalante (2015). Esto probablemente se deba a la naturaleza del sustrato y la pérdida de nitrógeno a lo largo del almacenamiento. Los valores obtenidos de NT (%) para King Grass reflejan un bajo contenido de nitrógeno, debido a que es considerado un sustrato ligno-hemicelulósico. Estos polímeros de compleja estructura son fuentes de carbono.

Weerayutsil, Khoyum y Khuanmar (2016) en su estudio de napier grass determinaron valores de 1.23 NT (%) los cuales son inferiores a los reflejados en la investigación (Cuadro 5). Esto se puede deber a la variedad usada y a la edad de corte. El King Grass debido al bajo NT (%) y alto CT (%) resulta ser un excelente sustrato para codigestión con la gallinaza. Esto se debe a que se logra estabilizar la relación C/N, evitando inhibiciones por parte del N (Bujoczek et al., 2000).

La relación C/N óptima para la digestión anaeróbica a temperatura mesófila está en el rango de 30:1 o 25:1. Un exceso de nitrógeno puede inhibir la digestión anaeróbica (Acosta y Obaya, 2005). Wang y colaboradores (2012) determinaron que una baja relación C/N puede alcalinizar el proceso a un pH de 8.5 por la acumulación de amonio.

También una alta relación C/N puede llegar a dar como resultado una baja producción de metano por el consumo de nutrientes. Estudios recomiendan diluir la gallinaza debido a su alto porcentaje de NT y su baja relación carbono para evitar inhibir el proceso (Bujoczek et al., 2000). Al tener una relación C/N mayor a la óptima, el King Grass puede presentar tiempos de retención mayores en comparación a otros sustratos, debido a la complejidad estructural del sustrato, por lo que la codigestión con gallinaza puede ser una alternativa para reducir los tiempos de retención (Rekha y Aniruddha, 2013).

Cuadro 5. Características físico - químicas de los sustratos.

Sustrato	pH	ST (%)	SV (%)	CT (%)	N (mg/L N - NH ₃)	NT (%)	C/N
Gallinaza	6.51	22.18	75.33	41.85	201.90	2.02	20.72
King Grass	ND	50.33	89.60	49.78	160.41	1.60	31.03
King Grass Hoja	ND	75.94	90.07	50.04	ND	ND	ND
King Grass Tallo	ND	33.96	89.37	49.65	ND	ND	ND

Donde: ND (No determinado)

Evaluación del incremento de temperatura en los efluentes finales.

Los reactores batch no presentaron fallas durante el proceso anaeróbico en ambas temperaturas de ensayo. La principal falla que se puede dar durante el proceso anaeróbico es la inhibición por acumulación de nitrógeno amoniacal, afectando al crecimiento del microorganismo metanogénicos. La acumulación de amonio provoca el incremento del pH a valores arriba de 8.5 desestabilizando el proceso. El cuadro 6 y 7 se muestran los valores de pH de los efluentes finales, los cuales se encuentran en el rango de (7 – 7.4) correspondiendo a pH en el rango de neutralidad, lo cual muestra que el proceso no sufrió inhibición por amonio.

El aumento de la temperatura disminuye la solubilidad de los gases como el CO₂ y favorece a gases en sus formas no ionizadas como NH₃ produciendo aumentos en el pH e inhibiciones en el proceso anaeróbico (Varnero, 2011). Marin - Batista, Castro y Escalante (2015) reporta que concentraciones de amonio arriba de 2000 mg/l inhiben el proceso anaeróbico. Acosta y Obaya (2005) reportan que concentraciones mayores a 3 kg/m³ de amoniaco puede inhibir el proceso, los resultados de nitrógeno amoniacal de los efluentes (Cuadro 6 y 7) no demuestran ningún valor arriba de 400 mg NH₃/L o 0.4 kg NH₃/L. Esto demuestra que la carga usada de gallinaza en el proceso anaeróbico no produjo un efecto inhibitor por su contenido de nitrógeno, al incrementar la temperatura tampoco se obtuvo un efecto inhibitor.

Cuadro 6. Características físico - químicas de los efluentes mesófilos.

Tratamiento	pH	ST (g/L)	SV (g/L)	CT (%)	NH ₃ (N - NH ₃ mg/L)	N - NH ₃ (%)	C/N
100 G	7.20	1.43	0.59	22.80	306.67	3.07	7.43
100 KH	7.03	1.45	0.69	26.24	280.25	2.80	9.37
100 K	7.00	1.78	0.80	24.73	297.79	2.98	8.30
50 G - 50 K	7.03	1.53	0.63	22.62	254.30	2.54	8.91
50 G - 50 KH	7.13	1.47	0.63	23.95	157.26	1.57	15.25
70 G - 30 KH	7.27	1.65	0.64	21.78	327.91	3.28	6.64
70 G - 30 K	7.13	1.69	0.67	23.34	391.48	2.44	9.57

Cuadro 7. Características físico - químicas de los efluentes termófilos.

Tratamiento	pH	ST (g/L)	SV (g/L)	CT (%)	NH ₃ (N - NH ₃ mg/L)	N - NH ₃ (%)	C/N
100 G	7.53	1.81	0.83	25.36	301.14	3.01	8.43
100 KH	7.40	1.78	0.96	29.67	254.30	2.54	11.68
100 K	7.45	1.28	0.70	31.06	254.30	2.54	12.23
50 G - 50 K	7.47	1.79	0.97	30.21	204.11	2.04	14.81
50 G - 50 KH	7.50	1.97	0.94	26.61	127.15	1.27	20.95
70 G - 30 KH	7.50	1.72	0.90	29.15	297.79	2.98	9.78
70 G - 30 K	7.50	1.82	0.98	29.91	267.68	2.68	11.16

Evaluación del incremento de la temperatura en la producción de metano.

Se obtuvo mayor productividad de metano y menores tiempos de retención en los reactores operados a temperatura mesófila en comparación a la termófila (Figura 3). Estudios reportan que el incremento de la temperatura da lugar a un aumento en las reacciones de los procesos biológico como es la tasa de crecimiento de los microorganismos. Esto favorece el uso de cargas orgánicas más altas en los reactores.

El incremento de la temperatura produce la reducción de los tiempos de retención y una mayor producción de biogás (Varnero, 2011). En el estudio los resultados reflejaron lo contrario a la literatura, esto probablemente se deba a que el inóculo para el rango de temperatura termófilo provenía de una fuente mesófila. Esto pudo haber provocado una deficiencia o desequilibrio en el proceso anaeróbico reduciendo producción de CH₄ y aumentando los TRH.

La mayor productividad de metano en ambas temperaturas se obtuvo en el tratamiento 100 K. Esto se debe a que a una mayor complejidad de la estructura del sustrato mayor es la capacidad de producción de ácidos orgánicos volátiles y por ende se puede obtener una mayor productividad de CH₄ (Figura 3). Gunaseelan (1997) en su revisión bibliográfica reporta una potencial de producción de metano del King Grass a edad de 120 días de 0.310 m³/kg SV, lo cual contrasta con la producción de metano que se tuvo en el estudio (0.440 m³/kg SV). Esta diferencia se debe a la edad de corte del King Grass a mayor edad el porcentaje de lignina aumenta en el King Grass lo que afecta el proceso de producción de metano.

Wang, Yang, Feng, Ren, y Han (2012) reporta un potencial de producción de metano para la gallinaza de 0.126 m³/kg SV, en el estudio para el tratamiento 100 G se obtuvo una producción de metano de 0.280 m³/kg SV, la diferencia se debe a la relación directa carga orgánica y nitrógeno. Esto demuestra que la carga usada en todos los tratamientos de 1 kg SV/m³ no provocó ninguna inhibición por nitrógeno al proceso anaeróbico, lo que se puede respaldar con los pH neutros de los diferentes efluentes finales.

El montaje que presentó los valores más altos de IPM para codigestión en ambas temperaturas fue el de 50 G – 50 K. Por otro lado, la combinación 70 G – 30 KH resultó con menor producción de CH₄ para ambas temperaturas. Se hace notar que para los montajes que resultaron en un bajo IPM solamente se utilizó la fracción de hojas del King Grass. La baja producción de metano en estos tratamientos se debe a la carencia de tallos en el proceso de digestión. El aporte de ácidos orgánicos volátiles del tallo a la carga orgánica (1 kg SV/m³) influye directamente en la producción de metano.

Weerayuttil, Khoyum y Khuanmar (2016) en su estudio de codigestión usando gallinaza y napier grass obtuvo la mayor productividad de metano usando la proporción 1:1 (G:K). Wilawan, Pholchan y Aggarangsi (2013) en su estudio de codigestión para gallinaza obtuvieron la mejor productividad de CH₄ (0.27 m³/kg SV) usando la proporción 50 - 50 (1:1) operando los reactores a 4% de ST. En el presente estudio la mejor productividad de CH₄ en codigestión en ambas temperaturas se obtuvo usando la proporción 50 - 50 (Figura 3).

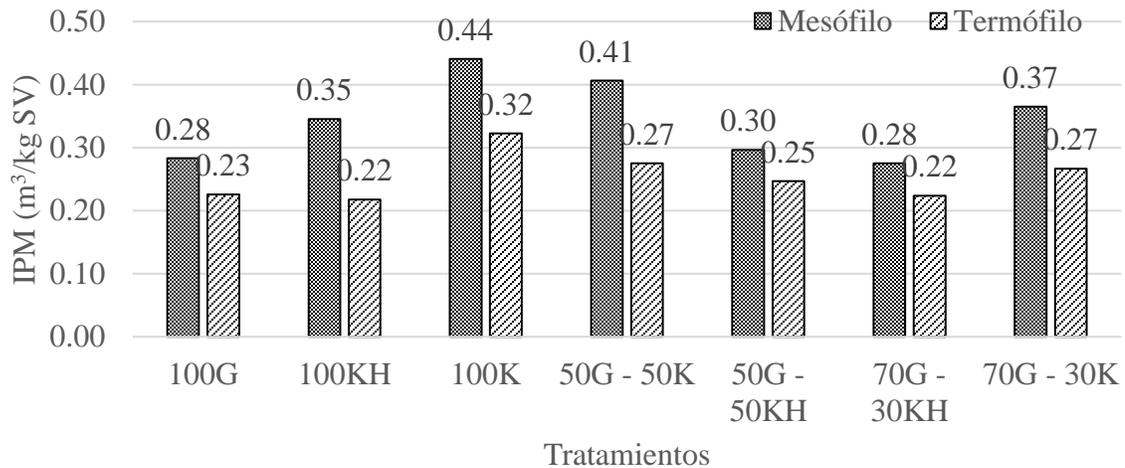


Figura 3. Producción de metano a partir de kg SV removido a temperatura mesófila.

Evaluación del incremento de la temperatura en los tiempos de retención.

De acuerdo a la literatura, el aumento de la temperatura en la digestión anaeróbica incrementa velocidad de las reacciones bioquímicas, reduciendo los tiempos de retención requeridos en el proceso (Buhr y Andrews, 1976). En el presente estudio se obtuvieron valores contradictorios a la literatura debido a que los TRH de los tratamientos mesófilos fueron menores que los tratamientos termófilos (Figura 4 y 5). Golueke (1958) en su estudio determina que, si una población de microorganismo en un digestor no se encuentra adaptado a un cambio de temperatura. Esto puede afectar negativamente la actividad bioquímica del proceso anaeróbico, afectando a los TRH y la productividad de CH₄. En la figura 5 se obtuvo una curva atípica y de baja productividad en los primeros 10 días de incubación, esto indica la adaptación de los microorganismos al incremento de temperatura.

Los TRH fueron tomados para cada tratamiento al obtener el 85% de productividad de CH₄ (Cuadro 8). El tratamiento mesófilo con menor TRH fue 100 G con 18 días (0.24 m³/kg SV), el tratamiento 100 K con la mejor productividad (0.38 m³/kg SV) tuvo un TRH de 31 días. Esto se debe a la estructura compleja del King Grass la cual contiene lignina por ende existe un aumento en los tiempos de retención. El tratamiento mesófilo individual con menor tiempo TRH y con mayor productividad fue 100 K con 28 días (0.28 m³/kg SV). A pesar de una inestable población de microorganismos se puede apreciar que el incremento de la temperatura favoreció el porcentaje de producción de CH₄ para los sustratos con estructuras más complejas (King Grass).

El tratamiento de codigestión mesófilo con menor TRH fue 50G – 50KH con 23 días (0.25 m³/kg SV). En contraste el tratamiento de codigestión con mayor productividad fue 50G – 50K obtuvo 29 días (0.35 m³/kg SV). En el tratamiento 50G – 50KH se puede observar que al no tener la presencia del tallo y al estar en una relación 1:1 el proceso anaeróbico ocurre en menor tiempo. El tratamiento de codigestión termófilo con menor TRH y con mayor

porcentaje de producción de CH₄ fue 50G – 50K con 28 días (0.24 m³/kg SV). El tratamiento de codigestión termófila tuvo el mismo TRH que el tratamiento individual termófilo 100 K (Cuadro 8), esto probablemente se deba a una mejor relación C/N en el proceso anaeróbico, ya que una alta relación C/N del King Grass puede agotar los nutrientes disponibles para los microorganismos.

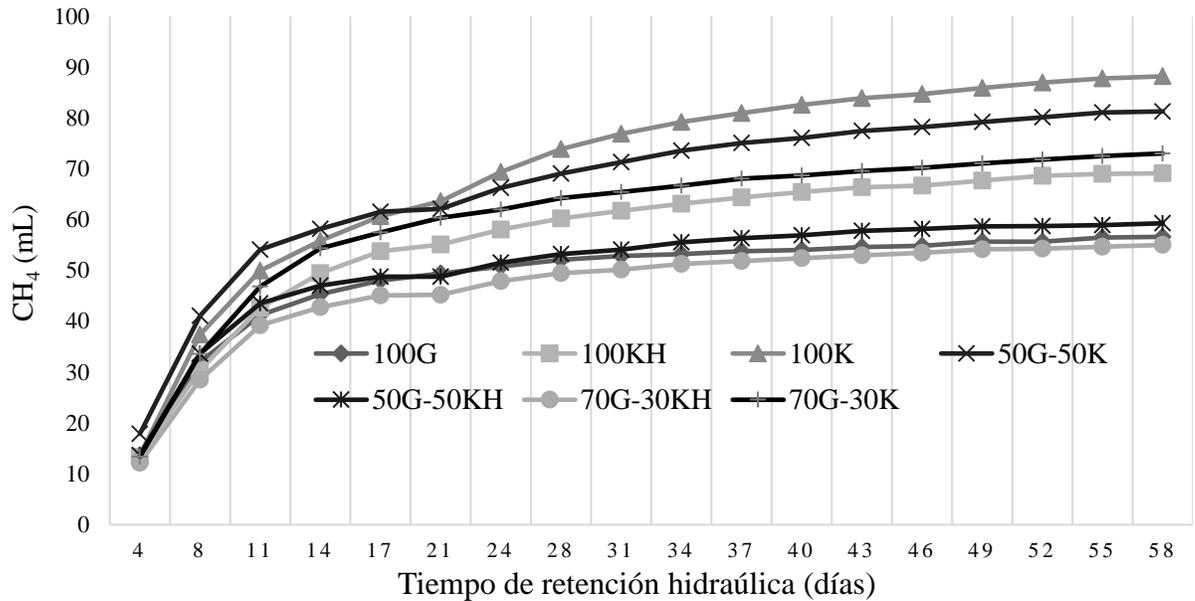


Figura 4. Índice de producción de metano a temperatura mesófila.

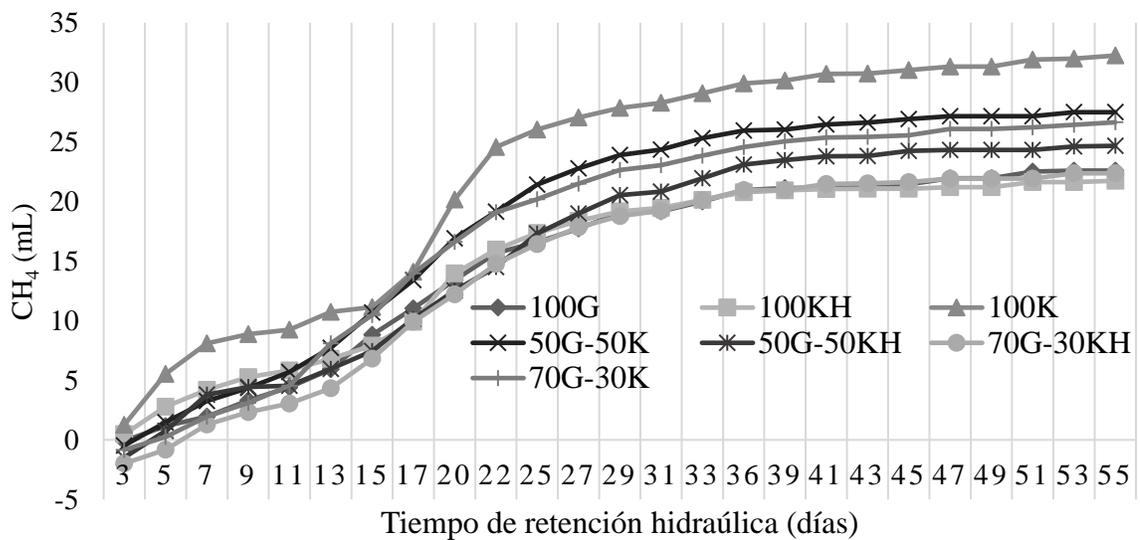


Figura 5. Índice de producción de metano a temperatura termófila.

Cuadro 8. Tiempos de Retención al 85% de productividad de metano.

Tratamiento	TRH	Mesófilo 85%	TRH	Termófilo 85%
	Mesófilo (días)	CH ₄ (m ³ /kg SV)	Termófilo (días)	CH ₄ (m ³ /kg SV)
100 G	18	0.24	30	0.20
100 KH	26	0.30	28	0.19
100 K	31	0.38	28	0.28
50 G - 50 K	29	0.35	28	0.24
50 G - 50 KH	23	0.25	31	0.22
70G - 30 KH	24	0.24	30	0.20
70 G - 30 K	25	0.31	30	0.23

Análisis estadístico.

El análisis estadístico determinó que los datos para la variable de respuesta producción de CH₄ y TRH son paramétricos en ambas temperaturas (Cuadro 8). La importancia de conocer la normalidad de los datos radica en la aplicación de las pruebas estadísticas.

Cuadro 9. Test de normalidad Shapiro - Wilk.

Tratamiento	Shapiro - Wilk		
	Estadístico	gl	Significancia
Producción de CH ₄ (Mesófilo)	.939	21	.210
Producción de CH ₄ (Termófilo)	.934	21	.169
TRH (Mesófilo)	.821	21	.576
TRH (Termófilo)	.633	21	.344

El análisis estadístico usado para determinar si existen diferencias estadísticas en la productividad de CH₄ a una misma temperatura fue un ANOVA + DUNCAN (Cuadro 10). En los reactores mesófilos si existen diferencias en la productividad de CH₄ entre tratamientos con un $p < 0.05$. En los reactores mesófilo estadísticamente los mejores tratamientos fueron 100 K y 50G – 50K, mientras que por estadística descriptiva el mejor tratamiento fue 100 K (Figura 6). En los reactores termófilos si existen diferencias en la productividad de CH₄ entre tratamientos con un $p < 0.05$. Estadísticamente en los reactores termófilos el mejor tratamiento fue 100 K. Por estadística descriptiva el mejor tratamiento fue 100 K (Figura 7).

Cuadro 10. Significancia de las pruebas estadísticas.

Factor	H₀	Prueba	Significancia
Tratamientos	1 H ₀	Anova de un factor + DUNCAN	0.001
Tratamientos	2 H ₀	Anova de un factor + DUNCAN	0.001

Donde:

1 H₀: Existe diferencia significativa entre la producción de metano de los reactores mesófilos.

2 H₀: Existe diferencia significativa entre la producción de metano de los reactores termófilos.

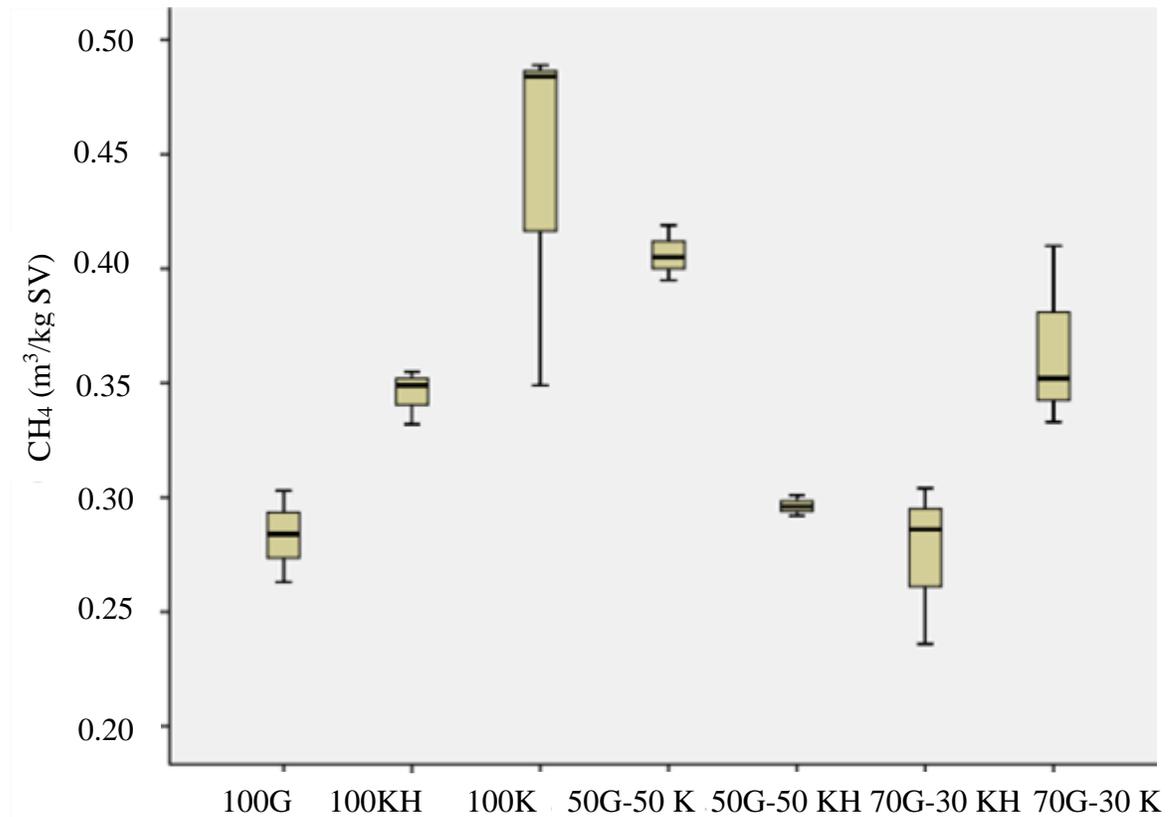


Figura 6. Cuadro de cajas de productividad de metano en reactores mesófilos.

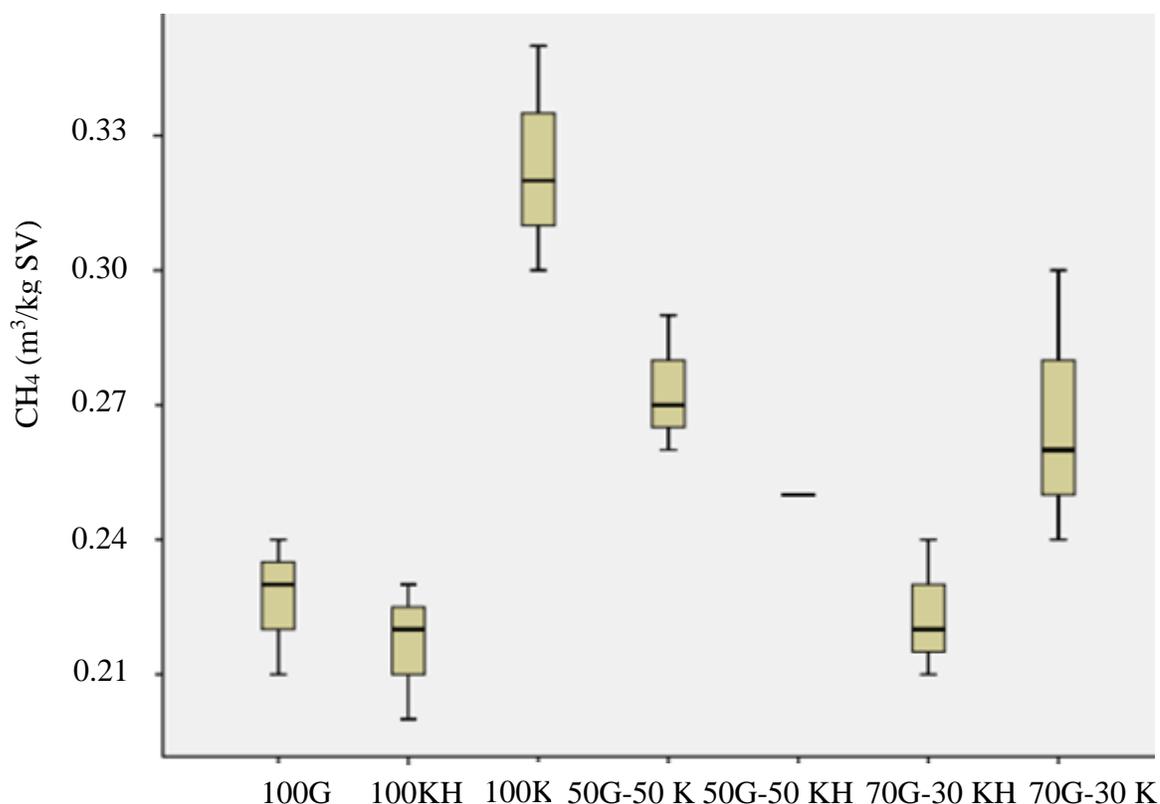


Figura 7. Cuadro de cajas de productividad de metano en reactores termófilos.

Los resultados de la prueba t - Student para conocer si existen diferencias significativas entre la producción CH_4 de un mismo tratamiento a diferentes temperaturas reflejaron los siguientes resultados (Cuadro 11). Los únicos tratamientos que no tuvieron diferencias significativas fueron 100 K y 70 G - 30 KH, esto quiere decir que estadísticamente estos tratamientos comparados con ellos mismo a diferentes temperaturas no tuvieron ningún tipo de diferencias en producción de metano. Mientras que los tratamientos restantes si presentaron diferencias significativas en la producción de metano a diferentes temperaturas.

Cuadro 11. Prueba t - Student para productividad de metano.

Tratamientos	Prueba t - Student		
	P - Valor		α
100 G	0.018	<	0.05
100 KH	0.001	<	0.05
100 K	0.071	>	0.05
50 G - 50 K	0.001	<	0.05
50 G - 50 KH	0.001	<	0.05
70 G - 30 KH	0.079	>	0.05
70 G - 30 K	0.028	<	0.05

Los resultados de la prueba t - Student para conocer si existen diferencias significativas en los TRH de un mismo tratamiento a diferentes temperaturas reflejaron los siguientes resultados (Cuadro 12). Los tratamientos que sí tuvieron diferencias significativas estadísticamente fueron 100 G, 50G – 50KH, 70G – 30H, aquí la temperatura si influye en los TRH de un mismo tratamiento.

Cuadro 12. Prueba t - Student para TRH.

Tratamientos	Prueba t - Student		
	P - Valor		α
100 G	0.003	<	0.05
100 KH	0.477	>	0.05
100 K	0.498	>	0.05
50 G - 50 K	0.710	>	0.05
50 G - 50 KH	0.022	<	0.05
70 G - 30 KH	0.020	<	0.05
70 G - 30 K	0.108	>	0.05

Por medio de estadística descriptiva se obtuvo los siguientes resultados para los reactores mesófilos (Figura 8). El tratamiento 100 G fue el de menor tiempo de TRH al producir el 85% de metano. Mientras que el tratamiento 100 K fue el de mayor TRH al producir el 85% de la producción de metano. Los resultados obtenidos para los reactores termófilos reflejaron que el tratamiento 100 K obtuvo la réplica con menor TRH, mientras que el tratamiento con la mediana de menor TRH fue 100 KH (Figura 9).

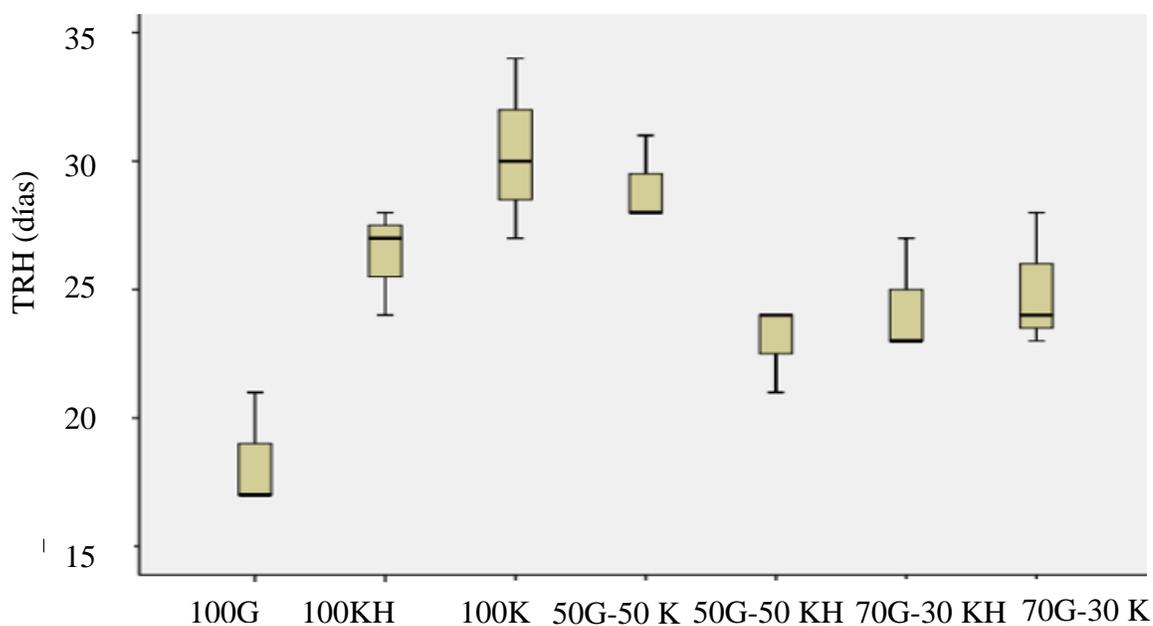


Figura 8. Cuadro de Caja de TRH para reactores mesófilos.

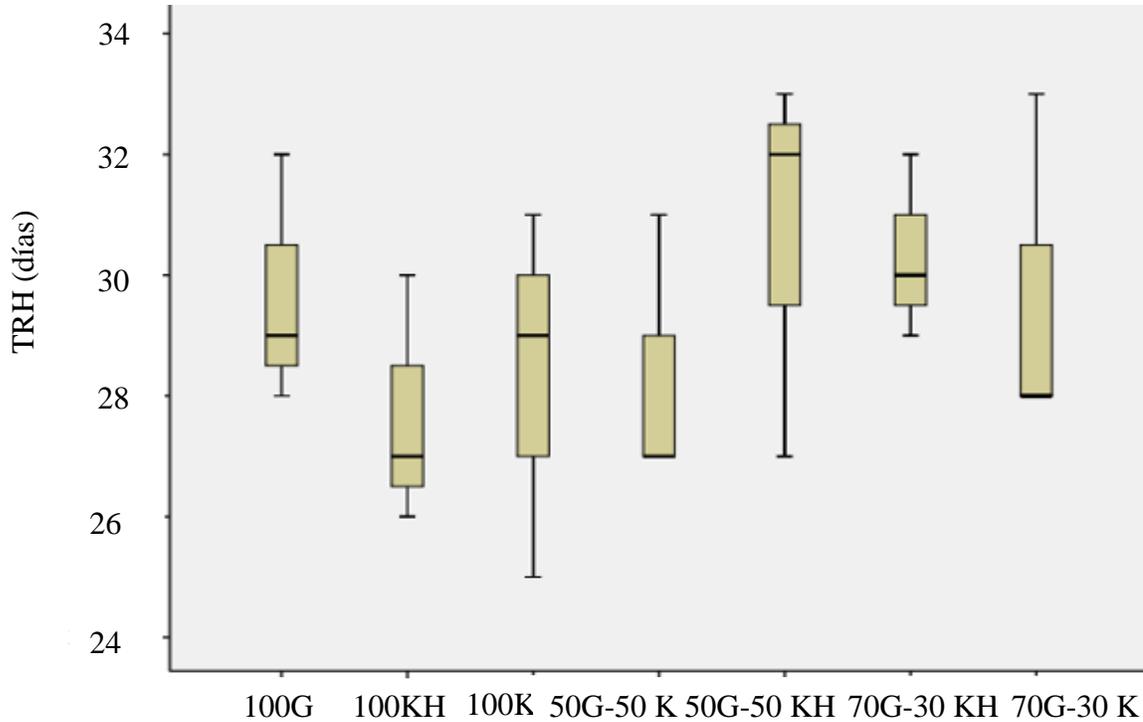


Figura 9. Cuadro de Caja de TRH para reactores termófilos.

Producción de CH₄ a partir kg SV removido.

La producción de metano a partir de la remoción en kg de SV de la materia orgánica sirve como un indicador de la eficiencia del proceso anaeróbico, llamado también como biodegradabilidad (Passeggi, 2016). Con la remoción de solidos volátiles se puede calcular la materia orgánica que no se transformó en CH₄. Debido a esto la productividad de CH₄ expresada en términos de la carga orgánica que fue removida como resultado de la digestión anaeróbica es mayor que el IPM. Los reactores mesófilos tuvieron mayor porcentaje de remoción de SV que los reactores termófilos (Cuadro 13 y 14). Por lo tanto, existe una mayor biodegradabilidad de los sustratos y a la vez las condiciones favorecen la transformación de la materia orgánica a CH₄. El impacto negativo del incremento de temperatura puede estar relacionado al proceso de adaptación de la población de microorganismos.

Cuadro 13. Producción de metano a partir de SV removido.

Tratamiento	Rango Mesófilo		
	Remoción de SV (%)	CH ₄ m ³ / kg SV (IPM)	CH ₄ m ³ / kg SV (Removido)
100 G	62	0.283	0.460
100 KH	54	0.346	0.644
100 K	46	0.441	0.967
50 G - 50 K	57	0.406	0.707
50 G - 50 KH	57	0.296	0.524
70 G - 30 KH	57	0.275	0.485
70 G - 30 K	57	0.365	0.644

Cuadro 14. Producción de metano a partir de SV removido.

Tratamiento	Rango Termófilo		
	Remoción de SV (%)	CH ₄ m ³ / kg SV (IPM)	CH ₄ m ³ / kg SV (Removido)
100 G	46	0.226	0.493
100 KH	35	0.217	0.613
100 K	53	0.323	0.612
50 G - 50 K	35	0.275	0.775
50 G - 50 KH	38	0.247	0.657
70 G - 30 KH	51	0.224	0.435
70 G - 30 K	36	0.266	0.750

Evaluación del incremento de la temperatura en el desempeño de los reactores batch.

La remoción de sólidos SV (%) fue impacta negativamente con el incremento de la temperatura reduciendo el porcentaje de remoción de SV en todos los tratamientos a excepción del tratamiento 100 K (Figura 10). Para los reactores termófilos no se obtuvo los resultados esperados de remoción de SV. Probablemente esto se deba a los microorganismos del inóculo no se adaptaron al incremento de la temperatura, los microorganismos del inóculo vienen de un biodigestor que opera a temperaturas mesófilas.

García - Caro, 2015 sustenta que una desventaja en la práctica de la digestión termófila es el largo período de aclimatización de las bacterias. Domínguez, Barceló y Martínez (2002) en su estudio obtuvieron que al aumentar la temperatura no existe una disminución en la remoción, debido a que a una mayor temperatura favorece el desarrollo de microorganismo de vida libre y no se formen colonias estables. El tratamiento 100 K con el incremento de la temperatura tuvo un impacto positivo en la biodegradabilidad del sustrato, aumentando de 45.6 a 52.7%, esto se debe al aumento de las reacciones bioquímicas obteniendo como ventaja una mayor reducción de sólidos volátiles (Sánchez, 1996).

En el rango de temperatura mesófilo el tratamiento 100 G tuvo el mejor porcentaje de remoción mientras que 100 K tuvo el menor (Figura 10). Esto se debe a la composición

bioquímica de los sustratos, la gallinaza al ser un sustrato de fácil dilución en un medio acuoso en comparación al King Grass se presenta como un sustrato con una mayor biodegradabilidad para ser aprovechada por los microorganismos (Varnero, 2011). En contraste a la remoción de sólidos volátiles el tratamiento de 100 K tuvo la mayor producción de metano ($0.441 \text{ m}^3/\text{kg SV}$). Esto se debe a la composición bioquímica del sustrato mientras más complejo puede llegar a tener una mayor producción de metano (Acosta y Obaya, 2005).

El tratamiento 100 KH tuvo un mayor porcentaje de remoción que el tratamiento 100 K, debido a que el tratamiento 100 K contiene mayor proporción de lignina la cual es un polímero casi inerte que protege a los polímeros biodegradables afectando la tasa de biológica de degradación (Chacón y Vargas, 2009; Rekha y Aniruddha, 2013). La remoción de sólidos volátiles en las codigestiones de los reactores mesófilo presentó valores muy similares entre sí con variaciones menores a 1%, pero mayores con valores mayores a los tratamientos 100 K y 100 KH (Figura 10).

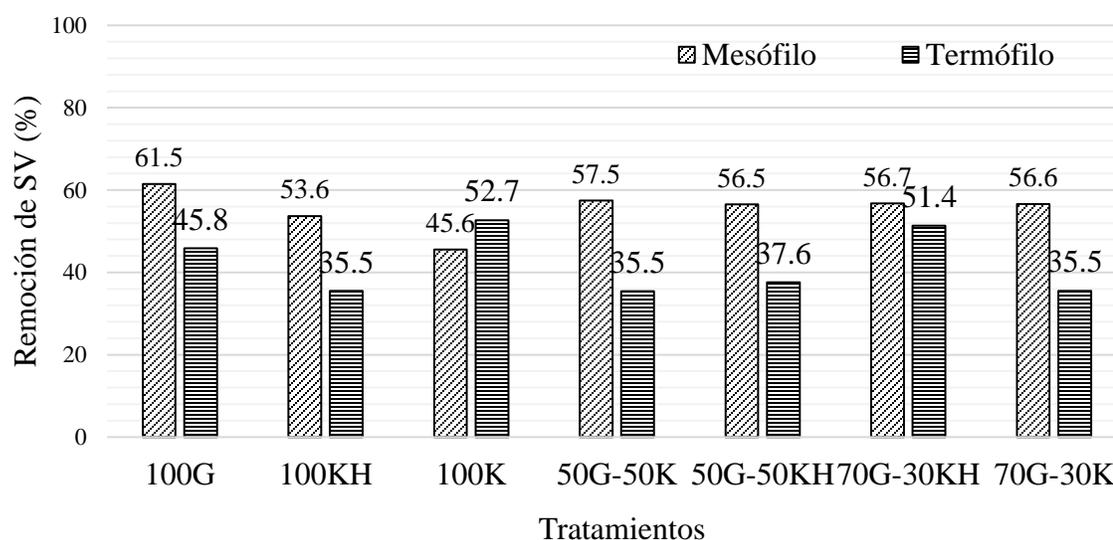


Figura 10. Porcentaje de remoción de SV a temperaturas mesófilas y termófilas.

4. CONCLUSIONES

- El tratamiento con mayor productividad de metano fue la digestión por separado del King Grass en ambas temperaturas. Al incrementar la proporción de este sustrato en la codigestión con gallinaza, se obtendrá un mayor rendimiento en la productividad de metano. Sin embargo, planteando la codigestión como solución ambiental para la gestión de la gallinaza, la proporción de King Grass debería $\leq 50\%$.
- El mejor desempeño en términos de productividad de metano y tiempos de retención se obtuvo en condiciones mesófilas a excepción del King Grass. El incremento de temperatura impactó negativamente en los reactores termófilos, disminuyendo la producción de CH_4 y aumentando los tiempos de retención. Se descarta una posible inhibición por nitrógeno ya que el pH para los reactores termófilos fue neutral y los valores de $\text{N} - \text{NH}_3$ estuvieron debajo del rango de inhibición.
- Los mejores resultados de remoción de la carga orgánica expresado como sólidos volátiles se obtuvieron en condiciones mesófilas. Los reactores termófilos fueron impactados negativamente por el incremento de la temperatura, reduciendo la eficiencia del proceso de tratamiento. Como solución ambiental para la gestión del residuo de gallinaza las mezclas de los sustratos se plantean como una excelente alternativa para la reducción de la carga orgánica y la generación de electricidad a partir del metano obtenido.

5. RECOMENDACIONES

- Identificar otros sustratos orgánicos obtenidos en el proceso de producción de la industria avícola que sean complementarios a los sustratos estudiados, para aumentar la productividad de metano.
- Realizar pruebas con el tratamiento 100 K en reactores termófilos y con diferentes cargas orgánicas.
- Utilizar inóculos de microorganismo adaptados a diferentes rangos de temperaturas, para evaluar así la productividad de CH₄ y remoción de carga orgánica.
- Realizar estudios evaluando el impacto que tiene el incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica del King Grass por separado a diferentes edades de corta.
- Evaluar si el aumento de la carga orgánica impacta en el proceso de digestión anaeróbica en los reactores alimentados únicamente con gallinaza.

6. LITERATURA CITADA

- Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), pp. 35-48.
- Araya Mora, M., & Boschini Figueroa, C. (2005). Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la Meseta Central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 16(1), pp. 37-43.
- Bermúdez, J. J., Canovas, M., Manjon, A., Iborra, J. L., Howell, J. A. (1988), La digestión anaerobia (Vol. 2), Murcia, España: EDITUM.
- Borowski, S., & Weatherley, L. (2013). Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge. *Bioresource Technology*, 142, pp. 345-352.
- Buhr, H. O., & Andrews, J. F. (1977). The thermophilic anaerobic digestion process. *Water Research*, 11(2), pp. 129-143.
- Bujoczek, G., Oleszkiewicz, J., Sparling, R., & Cenkowski, S. (2000). High solid anaerobic digestion of chicken manure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(1), pp. 51-60.
- Campos Pozuelo, E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria (tesis doctoral). Universidad de Lleida, Lérida, España.
- Chacón-Hernández, P. A., & Vargas-Rodríguez, C. F. (2009). Digestibilidad y calidad del *Pennisetum purpureum* cv. king grass a tres edades de rebrote. *Agronomía Mesoamericana*, 20(2), pp. 339-408.
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), pp. 4044-4064.
- Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E., & Peck, M. W. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 5(1), pp. 95-111.
- Herrera, J., Gonzáles, O., & Gonzáles, S. (2002). Efecto de la temperatura sobre la fermentación anaerobia de aguas residuales municipales. XXVIII Congreso

- Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-052.pdf>.
- Elefsiniotis, P., & Oldham, W. K. (1994). Influence of pH on the acid- phase anaerobic digestion of primary sludge. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 60(1), pp. 89-96.
- Flotats Ripoll, X., Bonmatí Blasi, A., Campos Pozuelo, E., & Antúnez, M. (1999). Ensayos en discontinuo de codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. Efecto del amonio. *Información Tecnológica*, 10(1), pp. 79-85.
- Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., & Mavris, V. (2007). Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable Energy*, 32(13), pp. 2147-2160.
- Golueke, C. G. (1958). Temperature effects on anaerobic digestion of raw sewage sludge. *Sewage and Industrial Wastes*, 30(10), pp. 1225-1232.
- Olaya, Y., & González, L. (2009). Fundamentos para el diseño de biodigestores. Modulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.
- Gunaseelan, V. N. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass and Bioenergy*, 13(1-2), pp. 83-114.
- Marin-Batista, J. D., Castro, L., & Escalante, H. (2015). Efecto de la carga orgánica de la gallinaza de jaula en el potencial de biometanización. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), pp. 18-23.
- Muñoz Castañeda, S. V. (2014). Formulación de un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos en la industria avícola “estudio de caso: Granja de Aves Ponedoras” (tesis de licenciatura). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Passeggi, M. (2016). Digestión anaeróbica de residuos sólidos: Diseño y operación de sistemas anaeróbicos. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería. Recuperado de https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/138941/mod_resource/content/2/DIGESTI%20S%20LIDOS.pdf
- Pym, R. (2013). Poultry genetics and breeding in developing countries. *Poultry Development Review FAO*, 1, pp. 80-83
- Rekha, B. N., & Aniruddha, B. P. (2013). Performance enhancement of batch anaerobic digestion of napier grass by alkali pretreatment. *International Journal of ChemTech Research*, 5(2), pp. 558-64.
- Riera, N. I., Della Torre, V., Rizzo, P. F., Butti, M., Bressan, F. M., Zarate, N., & Crespo, D. E. (2014). Evaluación del proceso de compostaje de dos mezclas de residuos

avícolas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo*, 46(1), pp. 195-203.

- Sánchez, G. M. M. (1996). *Digestión Anaerobia* (Vol. 1), Yucatán, México: UADY.
- FAO. (2010). Chicken genetic resources used in smallholder production systems and opportunities for their development, por P. Sorensen. FAO Smallholder Poultry Production Paper No. 5. Roma.
- Soria Fregoso, M. D. J., Ferrera Cerrato, R., Etchevers Barra, J., Alcántar González, G., Trinidad Santos, J., Borges Gómez, L., & Pereyda Pérez, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra Latinoamericana*, 19(4), pp. 353-362.
- Varnero, M. M. T. (2011), *Manual del Biogás*, Santiago de Chile, Chile: FAO.
- Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, 120, pp. 78-83.
- Weerayuttil, P., Khoyun, U., & Khuanmar, K. (2016). Optimum ratio of chicken manure and napier grass in single stage anaerobic co-digestion. *Energy Procedia*, 100, pp. 22-25.
- Wilawan, W., Pholchan, P., & Aggarangsi, P. (2014). Biogas production from co-digestion of Pennisetum purpurem cv. Pakchong 1 grass and layer chicken manure using completely stirred tank. *Energy Procedia*, 52, pp. 216-222.
- Williams, C. M. (2013). Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo. Función de las aves de corral en la nutrición humana. *Revisión del Desarrollo Agrícola*, 1, pp. 48-60.
- Yang, L., Xu, F., Ge, X., & Li, Y. (2015). Challenges and strategies for solid - state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, pp. 824-834

7. ANEXOS

Anexo 1. Prueba DUNCAN de la productividad de metano en los reactores mesófilos.

Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05				
		1	2	3	4	
HSD de Tukey	70 G - 30 KH	3	55.0333			
	100 G	3	56.6000			
	50 G - 50 KH	3	59.2667			
	100 KH	3	69.0667	69.0667		
	70 G - 30 K	3	73.0000	73.0000		
	50 G - 50 K	3		81.2667		
	100 K	3		88.1667		
	Significancia		.116	.085		
Duncan	70 G - 30 KH	3	55.0333			
	100 G	3	56.6000			
	50 G - 50 KH	3	59.2667	59.2667		
	100 KH	3	69.0667	69.0667	69.0667	
	70 G - 30 K	3		73.0000	73.0000	
	50 G - 50 K	3			81.2667	81.2667
	100 K	3				88.1667
	Significancia		.052	.051	.079	.280

Anexo 2. Prueba DUNCAN de la productividad de metano en los reactores termófilos.

Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	
HSD de Tukey	100 KH	3	21.7667		
	70 G - 30 KH	3	22.3333		
	100 G	3	22.6000	22.6000	
	50 G - 50 KH	3	24.6667	24.6667	
	70 G - 30 K	3	26.6667	26.6667	
	50 G - 50 K	3		27.5000	27.5000
	100 K	3			32.2667
	Significancia		.057	.057	.067
Duncan	100 KH	3	21.7667		
	70 G - 30 KH	3	22.3333		
	100 G	3	22.6000		
	50 G - 50 KH	3	24.6667	24.6667	
	70 G - 30 K	3		26.6667	
	50 G - 50 K	3		27.5000	
	100 K	3			32.2667
	Significancia		.088	.087	1.000