

Impacto de la inclusión de cerdaza como sustrato en la digestión anaerobia de purines

Yesenia Lisseth Armas Chuquimarca

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Impacto de la inclusión de cerdaza como sustrato en la digestión anaerobia de purines

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

Presentado por

Yesenia Lisseth Armas Chuquimarca

Zamorano, Honduras
Noviembre, 2016

Impacto de la inclusión de cerdaza como sustrato en la digestión anaerobia de purines

Yesenia Lisseth Armas Chuquimarca

Resumen: La digestión anaerobia es un tratamiento aplicable a los desechos orgánicos generados en la industria porcina, cuyos subproductos pueden ser aprovechados en la generación de energía y la disminución de carga orgánica previo al vertido de aguas residuales. Esta investigación tuvo como objetivo determinar el impacto de la inclusión de cerdaza en el proceso de digestión anaerobia de purines de la granja porcina de Zamorano. El estudio se llevó a cabo a escala laboratorio con la implementación de reactores batch operados con estiércol de las áreas de producción de gestación/maternidad y engorde. El diseño experimental contempla la interacción de los procesos de pre-tratamiento aplicado al residuo, las Cargas Orgánicas Volátiles (COV) y su impacto en el desempeño de los reactores. El residuo utilizado consistió en purines tratados mediante el separador de sólidos ubicado en la granja y el estiércol crudo que incluye la fracción insoluble conocida como cerdaza. Se realizó el montaje por triplicado de reactores batch, aplicando COV de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³ para cada sustrato. Se determinó el Índice de Producción de Metano (IPM) para cada reactor durante 60 días. Al operar con una COV de 1 kg SV/m³ se obtuvo la mayor productividad de metano y remoción de sólidos volátiles, reportando valores de IPM de 0.58 y 0.48 m³/kg SV para los purines tratados y estiércol crudo respectivamente, requiriendo para este último un mayor TRH y menor productividad de metano.

Palabras clave: Cerdaza, digestión anaerobia, índice de producción de metano, purines.

Abstract: Anaerobic digestion is a suitable treatment for the organic wastes generated at swine industry, where its byproducts can be used for energy generation as well as for reduce the organic load prior to effluent discharge. This research aims to determine the impact of the inclusion of the insoluble fraction of swine waste known as cerdaza, in the treatment process of pig manure at Zamorano. The study was performed at laboratory scale through the implementation of batch reactors operated with pig manure collected at pregnancy / maternity and feedlots areas. The experimental design involves the interaction of pre-treatment processes applied to manure, Organic Volumetric Loads (OVL), and its impact on reactors performance. The feedstocks used consisted on the filtered fraction obtained from the mechanical separator at the pig farm, and the raw manure which includes insoluble fraction. Triplicates of batch reactors were set up at OVL of 1, 3, 6 and 8 kg VS/m³ for each feedstock. The Methane Index Production (MIP) was determined for each reactor for 60 days. Higher yields and volatile solids removals were obtained when reactors were operated at OVL of 1 kg VS/m³, reporting MIP values of 0.58 and 0.48 m³/kg SV for the filtered fraction and raw manure respectively, requiring higher retention time with lower methane productivity for raw manure.

Keywords: Anaerobic digestion, methane production rate, pig slurry, swine waste.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
4. CONCLUSIONES	20
5. RECOMENDACIONES	21
6. LITERATURA CITADA	22
7. ANEXOS.....	25

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros		Página
1.	Aplicación de las cargas orgánicas volátiles suministradas a cada reactor.....	7
2.	Composición de los reactores batch para los tratamientos establecidos.....	9
3.	Cuantificación de residuo generado por área de producción en la granja de ganado porcino de la EAP.....	12
4.	Caracterización cualitativa promedio del residuo generado por área de producción en la granja de ganado porcino de la EAP.	13
Figuras		Página
1.	Ubicación de la Granja Porcina Educativa de la EAP, Zamorano, Honduras. .	5
2.	Esquema de recolección y caracterización del estiércol en la granja porcina de Zamorano.....	6
3.	Diseño experimental para comparación de productividad de metano.	8
4.	Rendimiento de producción de metano acumulado durante el proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de estiércol líquido.	14
5.	Rendimiento de producción de metano del tratamiento de estiércol líquido. ...	15
6.	Rendimiento de producción de metano acumulado durante el proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de estiércol crudo.	16
7.	Rendimiento de producción de metano para el tratamiento de estiércol crudo.	17
8.	Rendimiento de productividad de metano de los tratamientos de estiércol líquido y estiércol crudo con carga de 1 kg SV/m ³	18
9.	Eficiencia de remoción de sólidos volátiles de los tratamientos empleados.....	19
Anexos		Página
1.	Prueba de normalidad para el tratamiento de estiércol líquido.....	25
2.	Prueba de normalidad para el tratamiento de estiércol crudo.	25
3.	ANOVA para el tratamiento de estiércol líquido.....	25
4.	ANOVA para el tratamiento de estiércol crudo.....	25
5.	Prueba de Tukey para el tratamiento de estiércol líquido.....	26
6.	Prueba de Tukey para el tratamiento de estiércol crudo.	26
7.	Prueba de Tukey para el tratamiento de estiércol crudo.	27
8.	Prueba de medias de Tukey para el tratamiento de estiércol crudo.	27

9. Cuadro de cajas para las muestras de estiércol líquido a las cargas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³. 28

10. Cuadro de cajas para las muestras de estiércol crudo a las cargas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³. 29

11. Prueba de t-student para el tratamiento de estiércol líquido y estiércol crudo con carga de 1 kg SV/m³. 30

1. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables representan una alternativa para mitigar el problema del uso indiscriminado de combustibles fósiles en el mundo, los cuales se utilizan para obtener energía eléctrica que en muchos casos se aprovecha para procesos de calefacción e iluminación. Los biodigestores han sido utilizados como estrategia de manejo ambiental para reciclar desechos provenientes de procesos agroindustriales. Esta tecnología permite la transformación de desechos orgánicos provenientes de aguas residuales, desperdicios de comida y excretas de animales, los cuales poseen gran potencial energético. El proceso de digestión anaerobia genera productos como el biogás, efluentes líquidos conocidos como biol, es utilizado como fertilizante y la fracción sólida estabilizada (lodos) puede ser incorporado al suelo (Flotats, Campos y Bonmati, 1997).

La digestión anaerobia es el proceso de descomposición de la materia orgánica por acción de microorganismos en ausencia total de oxígeno. El resultado de esta digestión, es un gas cuya concentración promedio está conformada por 60% de metano, 38% de dióxido de carbono y 2% de otros gases (hidrógeno, nitrógeno, amoníaco, oxígeno y ácido sulfhídrico). La productividad del biogás depende específicamente de la cantidad de sólidos volátiles que se encuentren presentes en el tipo de materia orgánica utilizada como sustrato en la digestión anaerobia (Sonesson, Björklund, Carlsson y Dalemo, 2000).

La degradación bajo condiciones anaerobias se realiza en cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La fase de hidrólisis es donde los compuestos orgánicos son solubilizados por exoenzimas excretadas por bacterias hidrolíticas. Estas actúan en el exterior celular y convierten polímeros a monómeros, que se transforman en fuente de materia y energía para las células de los microorganismos (Acosta y Obaya, 2005). El desempeño de este proceso se ve influenciado por ciertos factores tales como: Tiempo de Retención Hidráulico (TRH), temperatura, pH, tamaño de partículas y la carga orgánica volátil (COV) aplicada (Gujer y Zehnder, 1983).

El TRH es considerado como el tiempo de permanencia de un sustrato dentro del sistema. Por lo que, el periodo debe ser lo suficientemente adecuado para que se lleve a cabo la fermentación y oxidación de la materia orgánica. Sin embargo, el tiempo va a depender del contenido de material particulado que ingrese al digestor. Al trabajar con TRH bajos no es posible la completa degradación de purines, durante el proceso de digestión anaerobia. En un estudio realizado por Hidalgo, Del Alamo, Hernández e Irusta (2003) se determinó que, a una carga orgánica de 1 kg SV/m³ con un tiempo de retención hidráulico de 20 días, la eliminación de la materia orgánica de purines de cerdo fue de 70%. Mientras que al implementar una carga de 10 kg SV/m³ disminuyó el tiempo de retención hidráulico y el porcentaje de remoción de materia orgánica fue de 40%.

Para definir el volumen del digestor es importante considerar el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica aplicada. La carga orgánica volátil es considerada la cantidad de materia orgánica que se introduce diariamente en el digestor (Varnero, 2011). Las altas cargas volátiles, disminuyen el tiempo de retención hidráulica, en ausencia de inhibidores aumentando la productividad de biogás. Sin embargo, al proporcionar altas cargas al digestor produce inestabilidad, provocando acumulación de los ácidos grasos volátiles y produciendo una disminución de biogás (Santolaria y Rebolledo, 2014). Por lo tanto, se recomienda trabajar con cargas menores a 4 kg SV/m^3 (Flotats y Sarquella, 2008).

Durante la fase metanogénica, la temperatura cumple un papel fundamental, debido a que las bacterias presentes en esta fase son altamente sensibles. Además, la velocidad de metabolismo de los microorganismos y la solubilidad de los sustratos se ven influenciados por la temperatura. Un aumento considerable en la temperatura podría retardar la producción de metano, por lo que, habría una excesiva producción de bacterias acidificantes y esto provocaría fallas en el digestor (Bidlingmaier, 2006). Se ha determinado que la temperatura óptima oscila alrededor de 30 a $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (rango mesófilo) para purines de cerdo (Flotats, Bonmatí, Campos y Antúnez 1999).

El pH es un parámetro que puede llegar a producir la toxicidad e inhibición de las bacterias (Cerón, Vidal y Lozada, 2005). Durante la fase metanogénesis es importante mantener este parámetro estable, debido a que las bacterias no sobreviven a un pH menor de 6. Sin embargo, a pH ácidos altera el funcionamiento del sistema, produciendo malos olores y reducción en la producción de metano por mortalidad de los organismos metanogénicos (Solano, Vargas y Watson, 2011).

El estiércol es el resultado del proceso digestivo del cerdo y se conforma por una fracción digerida y otra no digerida. El estiércol de cerdo está formado por las excreciones líquidas y sólidas. Mientras que los purines están constituidos por la unión de las excreciones líquidas y sólidas, más el agregado del agua residual proveniente del lavado de los corrales y restos de alimentos no ingeridos. En cambio, la cerdaza está constituida por la fracción de alimento consumido no digerido presente en el estiércol. Debido a esto, se realizan formulaciones nutricionales para ganado bovino utilizando cerdaza como ingrediente principal (Varnero, 2011).

Las excretas de cerdo son ricas en nitrógeno, este funciona como constituyente para la formación de estructura celular y fibras, también son materias ricas en carbono que sirven como fuente de energía (Guevara, 1996). Para obtener una mejor composición del residuo se ha determinado que la relación C:N (carbono-nitrógeno) adecuada en el biodigestor debe ser entre 15-30:1. Esto significa que por 30 unidades de carbón presentes en el sustrato, debe estar disponible una parte de nitrógeno.

En la actualidad existen un sin número de tecnologías disponibles para el manejo de estiércol en granjas de explotación porcina. Sin embargo, es importante seleccionar una tecnología que se adapte a las características propias de la granja, incluyendo el número de cerdos, la oportunidad de producción de energía renovable y el volumen de desechos orgánicos generados. Por lo cual, la cuantificación de estiércol es importante, pero a la vez resulta complicada, debido a la variabilidad de producción de desechos que genera el animal

en las diferentes etapas de su producción. El estiércol de cerdo que no ha recibido un tratamiento ambiental adecuado puede ser considerado como una amenaza para el suelo, aire y recurso hídrico (Mariscal, 2007).

Un cerdo en proceso de engorde consume 8.7 kg de alimento en su dieta al día, de la cual, tan solo el 33% (2.9 kg) son aprovechados. Motivo por el cual, las excretas de cerdo poseen una elevada concentración de nutrientes que pueden ser muy bien utilizados en procesos de digestión anaerobia. En un estudio realizado por Bragachini, Huerga, Mathier y Sosa (2015) se determinó que la cantidad de estiércol diario producido por un cerdo de producción intensiva con un peso de 25 a 100 kg, excreta 2.3 kg de estiércol crudo, 4.9 kg estiércol más orina y 7 kg de efluente líquido diariamente.

La aplicación exitosa de la digestión anaerobia en el sector porcino se ha verificado en diferentes proyectos de la región Centroamericana. Tal es el caso de la Granja Porcina Americana S. A. ubicada en Cartago, Costa Rica, en la cual, la producción excesiva de desechos porcinos que inicialmente pudo ser considerado un problema ambiental muy grave. En la actualidad se ha convertido en un proyecto significativo de abastecimiento energético a nivel internacional. La granja Americana S.A. tiene alrededor de 25,000 cerdos, estos alimentan diariamente al digestor con 150 m³ de excretas. Camacho (2013) asegura que, si el digestor funcionara a toda su capacidad, generaría hasta 250 kWh durante 16 horas al día.

Asimismo, se han desarrollado diferentes proyectos de investigación a escala piloto, como los del Centro Agropecuario San Pablo de la Universidad Nacional de Colombia, donde se evaluó un sistema de digestión anaerobia con la implementación de reactores de tipo discontinuo, con la finalidad de proveer un tratamiento adecuado a las aguas residuales de ganado porcino. El sistema se cargó tres veces en la semana con un volumen de 480 L/semanal en una mezcla de 3:1 de agua y estiércol, siendo el volumen de cada digestor de 12 m³ y un tiempo de retención para cada uno de 45 días. Los resultados obtenidos demostraron que la digestión anaerobia representa una alternativa viable para el tratamiento de estos residuos. Obteniendo una alta y eficiente productividad de biogás con una relación de 3:1 de m³ de biogás en m³ de biodigestor. La producción promedio de biogás fue de 62.30 m³ por semana (Saraz, Velásquez y Sánchez, 2007).

Se ha demostrado que la digestión anaerobia con purines de cerdo es una buena opción para tratamientos en codigestión con otros sustratos orgánicos. En un estudio realizado por Pozuelo (2005) se evaluó la productividad de metano por medio de codigestión con residuos de pera y purines de cerdos, en relaciones de 5 – 80%, 12.5 – 87.5% y 20 – 80% de Sólidos Volátiles, respectivamente. El experimento se llevó a cabo en reactores batch, el tiempo de retención hidráulica fue de 15 días a 35 °C de temperatura. Los resultados obtenidos de la productividad de biogás al finalizar el proceso, para las tres mezclas fueron de 0.217, 0.264 y 0.311 m³/kg SV. Al final del estudio se comprobó que la mayor productividad de biogás de 0.311 m³/kg SV se obtuvo con la mezcla de 20% de residuos de pera y 80% de purines de cerdo. Por tanto, la introducción de residuos orgánicos provenientes de la industria alimentaria en codigestión con excretas de cerdo es una buena opción para incrementar la productividad de biogás (Pozuelo, 2005).

Un estudio realizado por Cevallos e Hidalgo (2013), estimó el potencial energético en la granja porcina de Zamorano, caracterizando de forma cuantitativa y cualitativa las aguas residuales provenientes de la granja. Se utilizó un sistema de operación a escala laboratorio, por medio de biorreactores batch, determinando un Índice de Producción de Metano (IPM) de $0.37 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ y producción de biogás de $0.47 \text{ m}^3/\text{kg SV}$. Adicionalmente, se operó un biorreactor semicontinuo con agitación intermitente, operado a una carga orgánica de $3 \text{ kg SV}/\text{m}^3$ con un tiempo de retención hidráulica de 20 días, obteniendo remociones de hasta 90% de SV. Asimismo, se estimó el escenario óptimo de producción para el diseño de construcción que se tenía planificado, con una estructura de 115 m^3 .

En la granja porcina de la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), Zamorano, produce agua residual que contiene el estiércol y purines provenientes de los corrales de producción. Esta agua residual se mezcla con los desperdicios de agua usados en el lavado de corrales y bebederos, restos de concentrado y material añadido de forma manual como material vegetal (Galindo *et al.*, 2013). El agua residual es conducida desde los corrales de producción hasta una fosa de acopio de desechos, esta tiene una capacidad de 10 m^3 y las aguas atraviesan un separador de sólidos.

El separador de sólidos es un tamiz utilizado para remover la fracción insoluble presente en las aguas residuales recolectadas provenientes de las áreas de producción de engorde 1, engorde 2 y destete. La fracción soluble diluida en el agua residual es la que alimenta al digestor. Las cerdas que se encuentran en las áreas de maternidad y gestación excretan estiércol crudo con alto contenido de cerdaza debido a su dieta alimenticia. En estas áreas se realiza la limpieza de los corrales en seco, recogiendo la fracción sólida en carreta y se deposita al campo abierto sin tratamiento alguno.

El objetivo de la presente investigación fue determinar la influencia de la inclusión de cerdaza en el proceso de digestión anaerobia del estiércol generado en la granja de ganado porcino de la EAP. Para esto se propuso: i) Caracterizar los residuos generados en la unidad de ganado porcino previo al proceso de separación de sólidos. ii) Determinar la carga orgánica máxima que podría ser aplicada al digestor para cada uno de los tratamientos propuestos utilizando reactores batch. iii) Comprobar el desempeño de los reactores utilizando los residuos seleccionados, calculando su productividad de metano y la eficiencia en remoción de materia orgánica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El experimento se llevó a cabo a escala piloto, en el laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo de la EAP. La recolección de las muestras se realizó en la Granja Porcina Educativa de la EAP, Zamorano ubicada en San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras. La granja tiene aproximadamente 850 cerdos, distribuidos en cinco áreas de producción: gestación, maternidad, destete, engorde 1 y engorde 2 (Figura 1).

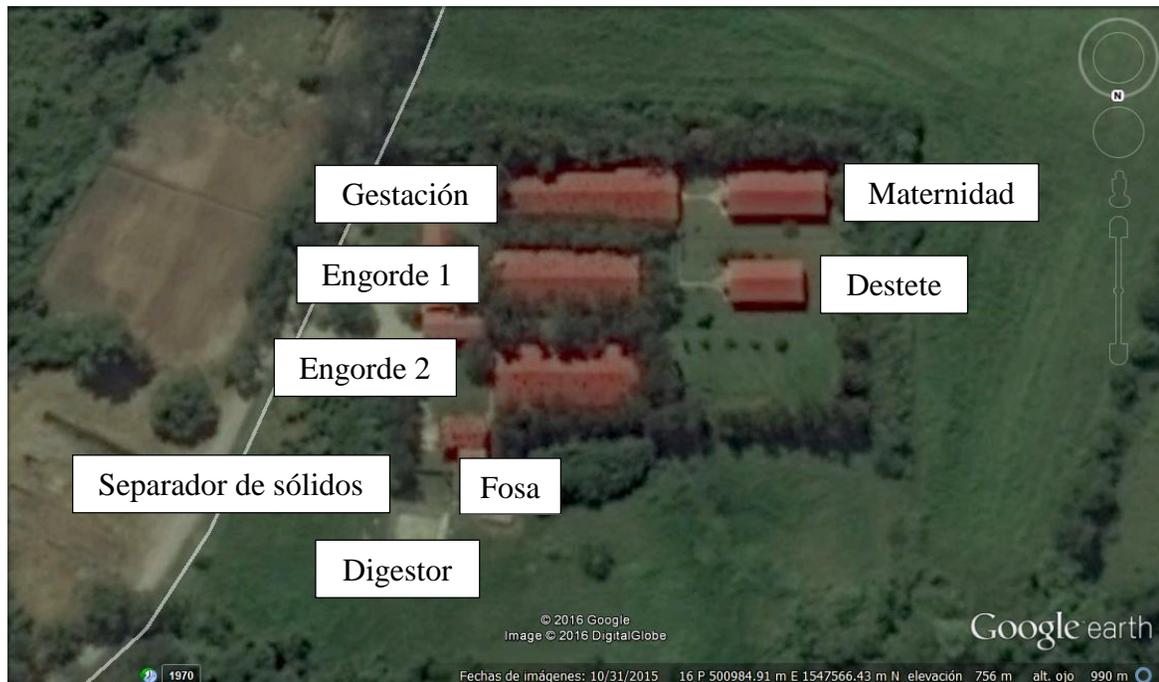


Figura 1. Ubicación de la Granja Porcina Educativa de la EAP, Zamorano, Honduras.

Fuente: Google Earth.

Cuantificación de los residuos. Se realizó la cuantificación por cada área de producción, esto debido al mal funcionamiento del separador de sólidos que impidió el acopio de las aguas residuales provenientes de todas las áreas de producción. La cuantificación de excretas se hizo una vez por semana durante cinco semanas a primera hora del día, debido a que por la mañana se hace el lavado de los corrales de las áreas de producción. La limpieza de los corrales de todas las áreas se hizo de forma manual, recogiendo todo el estiércol con

palas y escobas, colocando en recipientes plásticos para ser trasladados en carretilla a la balanza para su pesaje.

Caracterización de los residuos. Se recolectaron muestras por un espacio de seis días constantes de una libra de estiércol por cada área de producción: gestación y maternidad (estiércol crudo) y las áreas de engorde 1 y 2 (estiércol líquido) (Figura 2). Las muestras se colocaron en bolsas de plástico con sello hermético, identificando el área de procedencia y fecha de recolección. Inmediatamente las muestras se trasladaron al laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo y para su conservación se almacenaron a temperatura de 4 °C.

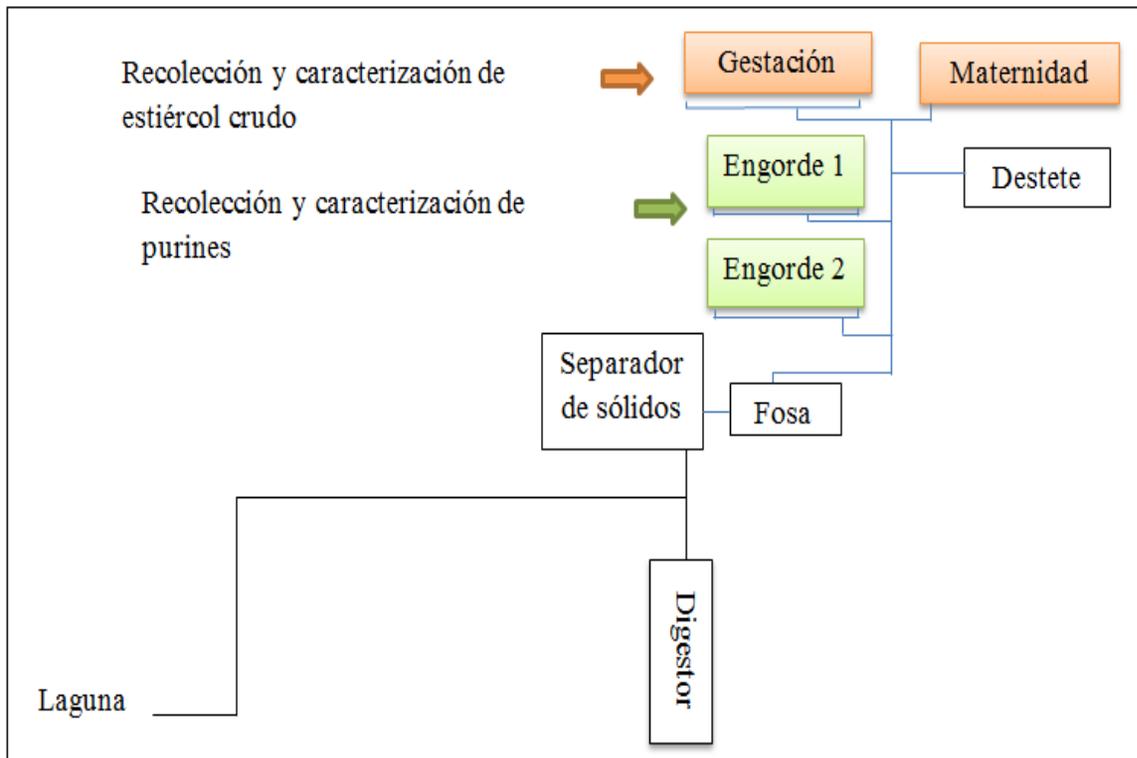


Figura 2. Esquema de recolección y caracterización del estiércol en la granja porcina de Zamorano.

Las muestras de estiércol crudo proveniente de las áreas de gestación y maternidad, se caracterizaron de forma individual y seguidamente se preparó una muestra compuesta con porciones iguales de ambas, estas se analizaron y fueron usadas para el montaje de los reactores batch. Se analizó el pH con un potenciómetro PCS Test 35 por el método 9045 D (APHA y AWWA, 2001), los Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles se evaluaron mediante el método 2540 G (*Total, Fixed, and Volatile Solid in Solid and Semisolid Sample*).

Se preparó una muestra compuesta de estiércol filtrado, combinando equitativamente las porciones individuales tomadas en las áreas de engorde 1 y engorde 2 y diluyendo a una relación de 1:3 con agua destilada. Esta muestra se filtró con un tamiz, buscando simular el efluente obtenido luego de pasar por el separador de sólidos en la planta de ganado porcino. Las porciones individuales, así como la muestra compuesta filtrada fueron caracterizadas mediante el análisis de sólidos totales bajo el método 2540 B (*Total Solid Dried at 103 – 105 °C*) y los Sólidos Totales Volátiles con el método 2540 E (*Fixed Volatile Solid Ingited at 550 °C*).

Recolección de biol y caracterización. El biol se obtuvo del digestor que se encuentra ubicado en el módulo de Energía Renovable de Zamorano. La recolección del biol se realizó dos días antes del montaje de los reactores. Para garantizar la actividad microbiana del inóculo, se colectó en un recipiente de cinco galones y se almacenó a temperatura ambiente. En la caracterización del biol se realizaron los mismos parámetros (pH, temperatura, Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles) de las muestras recolectadas en la granja porcina.

Selección de carga orgánica volumétrica. Se determinaron cuatro concentraciones de cargas orgánicas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³ para los tratamientos de estiércol líquido y estiércol crudo. Adicional se montó un control compuesto por biol y agua destilada a una carga de 0 kg SV/m³, más una muestra estándar compuesta por glucosa y agua destilada con una carga de 1 kg SV/m³. Se realizaron tres replicas para cada tratamiento, esto con la finalidad de obtener representatividad en el comportamiento de las cargas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Aplicación de las cargas orgánicas volátiles suministradas a cada reactor.

Tratamiento	Carga Orgánica Volátil (kg SV/m³)
Estiércol Líquido	1.00
	3.00
	6.00
	8.00
Estiércol Crudo	1.00
	3.00
	6.00
	8.00
Control/Blanco	0.00
Estándar/Glucosa	1.00

Montaje de los reactores batch. En el proceso de digestión anaerobia para los tratamientos de estiércol crudo y estiércol líquido, se trabajó con reactores batch de una sola alimentación. Los reactores batch son botellas de suero con capacidad de 250 ml, se componen de una fase líquida (200 ml) y una gaseosa (50 ml), según la metodología descrita por Angelidaki et al. (2009) para realizar el montaje de los reactores (Figura 3).

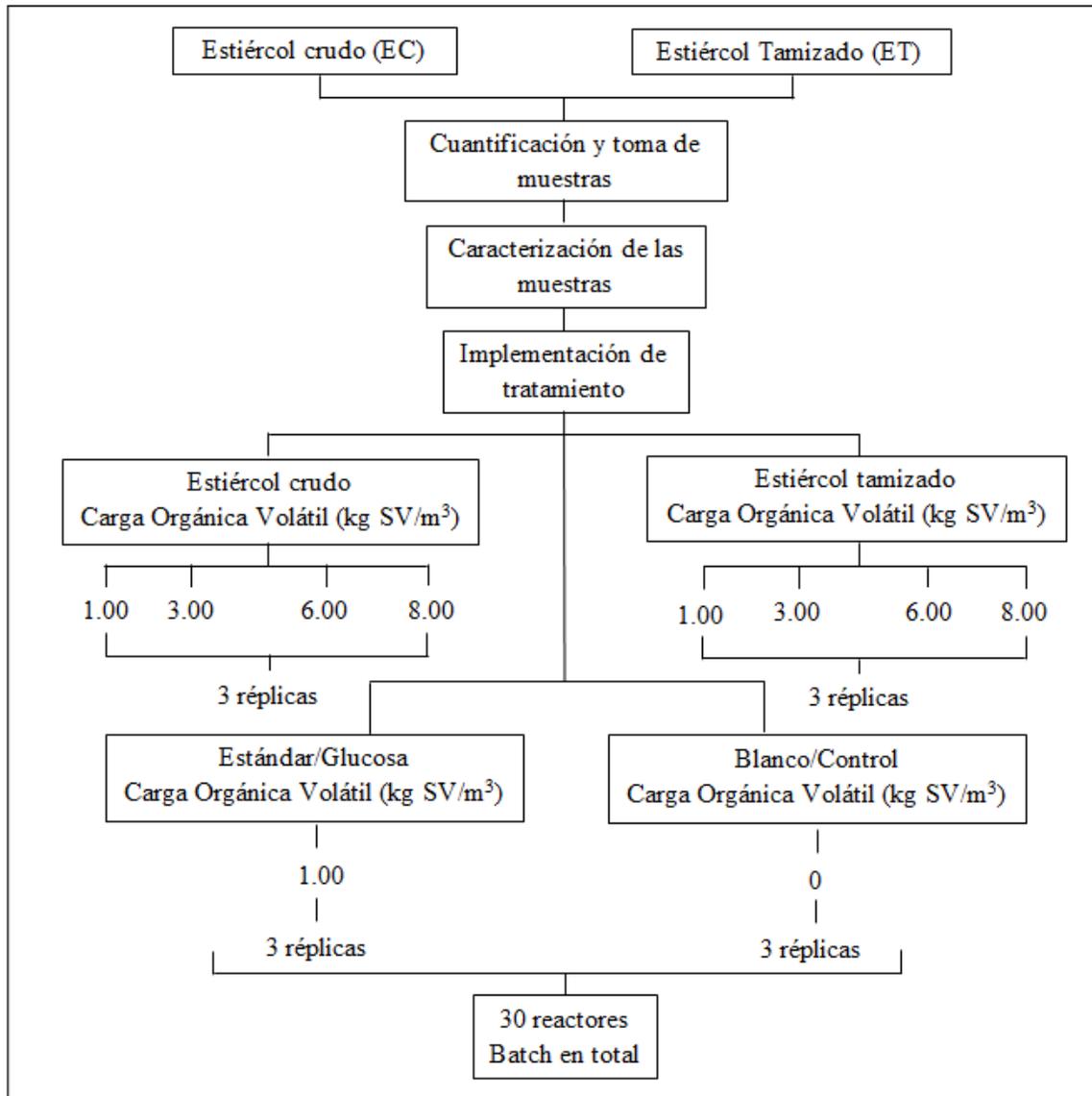


Figura 3. Diseño experimental para comparación de productividad de metano.

Cantidad de materia húmeda. Debido a que en el estudio se establecieron las cargas orgánicas volátiles implementadas en los reactores, se calculó la cantidad de materia húmeda necesaria para alcanzar la carga establecida, mediante la ecuación 1.

$$M_h = \frac{COV \times V_1}{(\%ST/100)(\%SV/100)} \quad [1]$$

Donde:

M_h : Materia húmeda (mg).

COV: Carga Orgánica Volátil (mg SV/ml).

V_l : Volumen líquido (ml).

ST: Sólidos Totales (%).

SV: Sólidos Volátiles (% de los Sólidos Totales).

Al realizar el montaje de los reactores se registró el pH, temperatura, Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles. La cantidad de materia húmeda requerida de estiércol crudo como de estiércol líquido para cada una de las cargas orgánicas se diluyeron en agua destilada hasta alcanzar un volumen de 100 ml. Cada reactor se completó con biol fresco hasta obtener un volumen líquido de 200 ml. El biol es el agente inoculante que proporciona microorganismos metanogénicos necesarios para el proceso de digestión anaerobia (Borja, Martín y Durán, 1992).

El blanco se formó de 100 ml de biol más 100 ml de agua destilada, este permitió corregir la cuantificación de la producción de metano atribuida al inóculo. Adicionalmente se contó con el montaje de un ensayo denominado estándar, compuesto de 100 ml de biol más 0.2 gr de glucosa diluida en agua destilada hasta alcanzar un volumen de 200 ml (Cuadro 2).

Cuadro 2. Composición de los reactores batch para los tratamientos establecidos.

Sustratos	Composición de los reactores batch para cada tratamiento
Estiércol Líquido	100 ml biol + 100 ml de estiércol líquido en agua destilada
Estiércol Crudo	100 ml biol + 100 ml de estiércol tamizado en agua destilada
Control/Blanco	100 ml biol + 100 ml de agua destilada
Estándar/Glucosa	100 ml biol + 100 ml glucosa diluida en agua destilada

Una vez listos los reactores se cerraron de forma hermética con tapones de goma y sellos de aluminio, esto para crear condiciones anaerobias y se agitaron para mezclar el inóculo con el sustrato. Posteriormente, se colocaron boca abajo en una rejilla, para crear un sello hidráulico y así evitar posibles fugas de gas, finalmente se incubaron a 35 °C.

Lectura del metano producido. Para realizar la medición de metano registrado se utilizó una botella con una solución básica de Hidróxido de Potasio (KOH) y rojo de alizarín como indicador. Esta botella se colocó de forma invertida y se sujetó con pinzas en un soporte metálico. El reactor batch se conectó al frasco con solución alcalina por medio de una aguja y manguera controlada por una válvula. A su vez, la botella que contenía la solución alcalina se conectó a una pipeta plástica graduada, usando una manguera controlada por una segunda válvula.

Una vez interconectado todo el sistema, se abrió la válvula conectada a la pipeta para dar paso a la solución de KOH desplazándose hasta alcanzar una lectura estable del volumen, luego se abrió cuidadosamente la válvula que controlaba el flujo de gas del reactor

provocando un desplazamiento de la solución alcalina por la bureta antes calibrada. El diferencial de volumen desplazado de KOH que atraviesa el sistema, es el equivalente al volumen de metano generado un reactor batch (Wilkie, Smith y Bordeaux, 2004). Esta operación se realizó por espacio de tres días hasta completar el periodo de producción de metano, mismo que fue de 60 días.

Cuantificación de producción de metano. Durante la cuantificación de producción de metano se registraron las variables de temperatura ambiente y presión atmosférica. El volumen de metano medido debe estar corregido a condiciones normales de presión y temperatura, por lo que se empleó la ecuación 2.

$$V = \frac{V_r \times P_r \times T}{P \times T_r} \quad [2]$$

Donde:

V: Volumen de metano corregido (ml).

V_r: Volumen registrado de metano (ml).

P_r: Presión atmosférica registrada (bar).

T: Temperatura a condición normal (Kelvin).

P: Presión atmosférica en condición normal (bar).

T_r: Temperatura ambiente absoluta (Kelvin).

Índice de Producción de Metano (PM). La cuantificación de metano es importante debido a que es el principal componente de la formación de biogás. Una vez corregidos los valores de producción de metano a condiciones normales, se determinó el Índice de Producción de Metano (IPM). Para lo cual se empleó la ecuación 3.

$$IPM = \frac{V_{CH_4}}{COV \times V_m} \quad [3]$$

Donde:

IPM: Índice de Producción de Metano (ml CH₄/mg SV).

V_{CH₄}: Volumen de metano corregido (ml).

COV: Carga Orgánica Volátil (kg SV/m³).

V_m: Volumen líquido del reactor (ml).

Eficiencia de Remoción de Sólidos Volátiles (ERSV). Una vez completado el proceso de digestión, los reactores fueron destapados y se procedió a analizar los mismos parámetros iniciales de pH, temperatura, sólidos totales, sólidos totales volátiles y volumen líquido. Para calcular el porcentaje de remoción se hizo uso de la siguiente ecuación 4:

$$ER\ SV = \frac{SV_i - SV_f}{SV_i} \quad [4]$$

Donde:

ERSV: Eficiencia de Remoción de Sólidos Volátiles (%ST).

SV_i: Sólidos Volátiles iniciales de los sustratos (%ST).

SV_f: Sólidos Volátiles finales del efluente (%ST).

Análisis estadístico. A los datos obtenidos del IPM de estiércol crudo y estiércol líquido a diferentes cargas orgánicas volumétricas se les aplicó una prueba de Shapiro Wilks para determinar la normalidad de datos. Posteriormente, se aplicó un Análisis de Varianza (ANDEVA) de una vía para determinar si hubo diferencias significativas en la productividad de metano al incrementar la COV. Al encontrar diferencia significativa ($p < 0.05$), se procedió a realizar la prueba post hoc de Tukey, para determinar la carga que presentó un mejor desempeño. Seguidamente, se comparó la carga más efectiva de cada sustrato mediante una prueba de t-student con el fin de determinar el sustrato con mejor rendimiento en el tratamiento bajo condiciones anaerobias. El procesamiento de los datos se llevó a cabo en el programa SPSS[®] (Statistical Package for the Social Sciences), versión 19.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación del residuo. La granja porcina de la EAP genera un total de 1,347.1 kg de estiércol al día, en todas las áreas de producción (Cuadro 3). Este no incluye la fracción líquida generada en el área de destete, debido a que los corrales son ubicados de forma superficial y poseen un canal de drenaje interno que no permitió la recolección del residuo para su posterior cuantificación.

Además, no se tomó en cuenta el agua residual generada luego de la recolección del estiércol para el lavado de los corrales, debido a que la fosa de acopio no se encontraba en funcionamiento y el efluente era derivado en forma directa a la laguna. Se determinó que en promedio un cerdo de 100 kg produce 2.14 kg de estiércol diario, lo cual es similar a un estudio realizado por Bragachini et al. (2015) donde determinaron que la producción de estiércol de cerdo es de 2.3 kg al día.

Cuadro 3. Cuantificación de residuo generado por área de producción en la granja de ganado porcino de la EAP.

Área de producción	Peso de estiércol (kg)	Unidad animal*	kg de estiércol/cerdo ⁻¹ día
Maternidad	47.6	22	2.1
Gestación	86.9	81	1.1
Engorde 1	595.7	205	2.9
Engorde 2	616.9	239	2.6
Total	1347.1	628	2.18

*El peso promedio de una unidad animal es de 100 kg.

Caracterización del residuo. Una vez recolectadas las muestras de estiércol de cerdo de las diferentes áreas de producción se realizó la caracterización del residuo. Los parámetros analizados de pH, temperatura, Sólidos Volátiles y Sólidos Totales son de importancia para el cálculo de las cargas orgánicas volumétricas que serán aplicadas a cada reactor batch (Cuadro 4).

Cuadro 4. Caracterización cualitativa promedio del residuo generado por área de producción en la granja de ganado porcino de la EAP.

Área de Producción	Parámetros			
	pH	Temperatura (°C)	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)
Engorde 1	6.05	27.25	30.48	83.81
Engorde 2	6.14	27.10	33.34	81.77
Engorde 1 y 2	6.09	26.85	32.01	82.87
Gestación	6.56	26.90	38.36	73.32
Maternidad	6.38	26.85	39.46	76.22
G y M*	6.44	27.02	36.85	75.10

* Gestación y Maternidad.

Los valores de pH encontrados en la mayoría de las muestras de estiércol de cerdo se encuentran dentro del rango 6.5 – 8, esto indica que no retardan el proceso de fermentación dentro del sistema (Fregoso *et al.*, 2001), excepto el área de engorde 1. No obstante se registró que el estiércol de cerdo en la granja presenta un pH promedio de 6.26, el cual favorece la acidificación. Cevallos e Hidalgo (2013) caracterizaron la fosa de acopio de la granja de cerdos de la EAP, y encontraron rangos de pH entre 6.8 – 8.4. Una vez que las muestras ingresaron al laboratorio se registró la temperatura, la cual fue de 27.06 °C en promedio.

Las áreas de engorde 1 y 2 aportan diariamente 1,216 kg de estiércol de cerdo (en base húmeda) mismo que ingresan a la fosa de acopio y posteriormente alimentan al digestor. Esta cantidad de residuo es equivalente a 293.56 kg de sólidos volátiles. Los residuos provenientes de las áreas de producción de engordes representan el 90% de los desechos totales generados en la granja. De este total, el 23% está compuesto por cerdaza, la cual representa la fracción insoluble del residuo. El 87% restante (1,050 kg) es considerado el estiércol líquido que compone el material soluble y este se alimenta el digestor. El 10% de los residuos generados en la granja porcina procede de las áreas de gestación y maternidad, los mismos no cuentan con ningún tipo de tratamiento y tampoco se colectan en la fosa de acopio, sino que son desechados a campo abierto.

Se determinó que las áreas de engorde 1 y engorde 2 poseen en promedio 32.01% de sólidos totales y las áreas de gestación y maternidad 36.85%. En un estudio realizado por Fregos *et al.* (2001) determinó que para que exista mayor eficiencia en el proceso de digestión anaerobia para excretas líquidas de cerdo es necesario contar con un mínimo de 12% de sólidos totales. Se determinó que la proporción volátil de la materia seca presente en las muestras de estiércol fue en promedio de 82.87% para las áreas de engorde 1 y 2, y de 75.10% para las áreas de gestación y maternidad.

Determinación del Índice de Producción de Metano. En los tratamientos de estiércol líquido aplicados con cuatro cargas orgánicas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³ se registró una producción de 0.56, 0.45, 0.48 y 0.43 m³ CH₄/kg SV respectivamente. Se realizó la

cuantificación de metano acumulado a cada residuo y a cada carga, esto se hizo luego de completar un TRH de 60 días. Se observó que la carga de 1 kg SV/m³ registró menor cantidad de metano acumulado comparada con la carga de 8 kg SV/m³ que cuantificó el valor máximo acumulado. Sin embargo, la productividad de metano (m³ CH₄/kg SV) fue mayor para la carga de 1 kg SV/m³ comparada la carga de 8 kg SV/m³.

La carga de 1 kg SV/m³ alcanzó el 90% de producción de metano en un TRH de 24 días, mientras que para las cargas de 3 y 6 kg SV/m³ fue necesario un periodo de 33 días y la carga de 8 kg SV/m³ en el mismo escenario de producción se registró en 36 días. Lo cual indican que para completar la producción total al 100% se requiere que el sustrato permanezca en el digestor el doble de tiempo registrado, impactando directamente en el tamaño del digestor y que se necesitaría una infraestructura el doble de tamaño para producir únicamente un 10% más de metano (Figura 4).

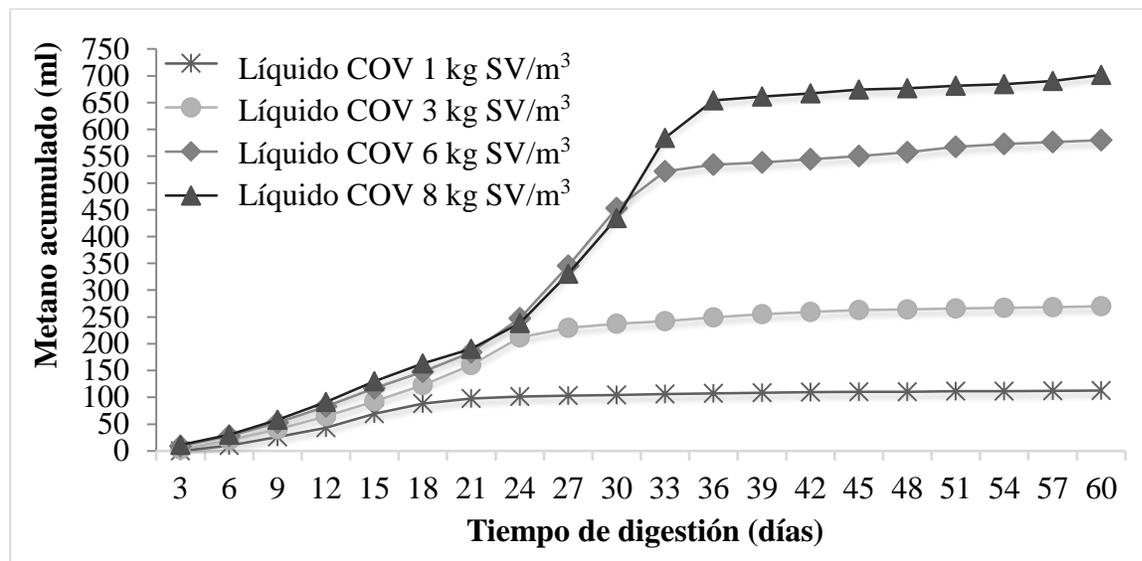


Figura 4. Rendimiento de producción de metano acumulado durante el proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de estiércol líquido.

Se le aplicó una prueba de Shapiro Wilk a los resultados obtenidos del ensayo con estiércol filtrado, determinando que los datos provienen de una población normal ($p > 0.05$). Seguidamente se aplicó un ANOVA y se registró que existe diferencia significativa entre las cargas aplicadas ($p < 0.05$). Luego se aplicó un Test Tukey para determinar la carga orgánica que presenta mayor productividad de metano acumulado, la mejor carga fue de 1 kg SV/m³ donde generó una productividad de 0.56 m³/kg SV ($F=0.916$, $gl=3$, $p=0.274 > 0.05$) (Figura 5).

En un estudio anterior realizado por Cevallos e Hidalgo (2013) en la granja porcina se evaluó el efluente de la fosa de acopio con una carga de 0.5 kg SV/m³ donde se obtuvo un promedio del índice de producción de metano de 0.35 m³ kg/SV. Lo cual indica que la carga óptima para operar el digestor es de 1 kg SV/m³ alcanzando un IPM mayor a 0.5 m³ kg/SV.

Entre más baja fue la carga orgánica aplicada, el punto máximo de producción se obtuvo en un tiempo de retención hidráulico menor. Debido a que la cantidad de alimento disponible es más fácil de digerir por las bacterias, figurándose en la rápida producción de gas como entre los días 3 y 6 de medición. Para el pico de producción de metano en la carga de 1 kg SV/m³ se obtuvo en 15 días a diferencia de la carga de 8 kg SV/m³ que fue en 33 días (Figura 5).

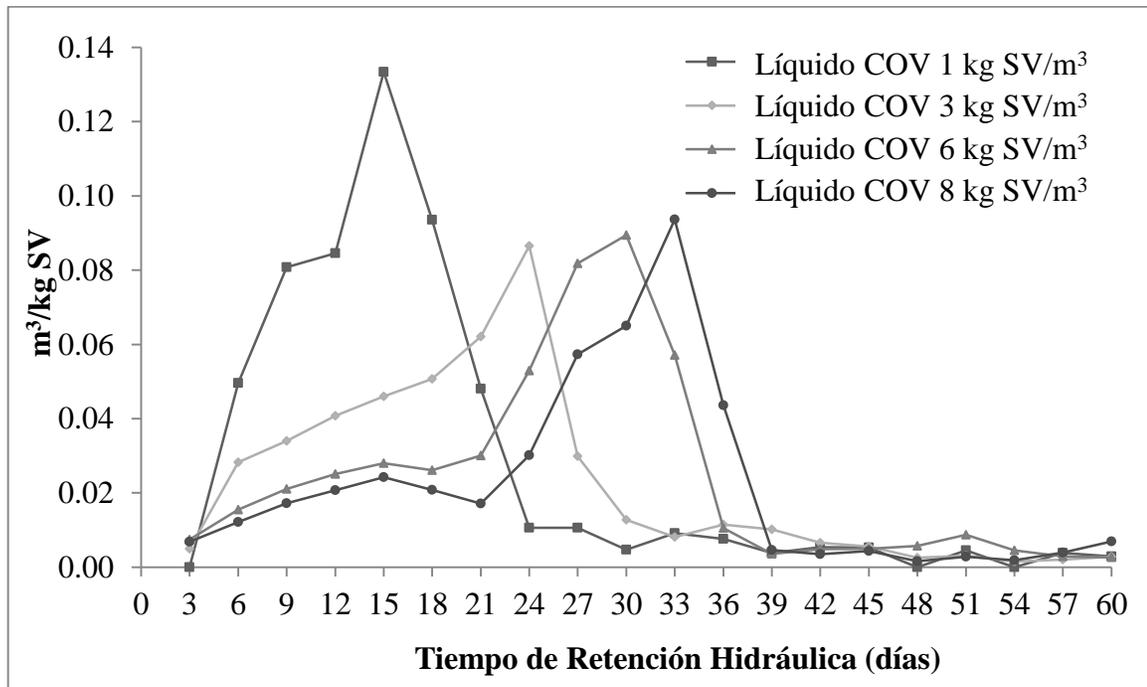


Figura 5. Rendimiento de producción de metano del tratamiento de estiércol líquido.

Para el tratamiento de estiércol crudo con cargas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³ se calculó el IPM, registrando una productividad de metano acumulado de: 0.48, 0.38, 0.35, 0.33 m³/kg SV respectivamente. Se observó que la carga de 1 kg SV/m³ registró menor metano acumulado a diferencia de la carga de 8 kg SV/m³ que cuantificó el valor máximo acumulado. Sin embargo, la productividad de metano (m³ CH₄/kg SV) fue mayor para la carga de 1 kg SV/m³ que para la carga de 8. La carga de 1 kg SV/m³ alcanzó el 90% de producción de metano en un TRH de 27 días, mientras que la carga de 3 kg SV/m³ requirió un periodo de 30 días y las cargas de 6 y 8 kg SV/m³ se registró en 36 días bajo el mismo escenario de producción. Por ende, para obtener una producción completa de 100% se requiere un digestor con el doble de volumen (Figura 6).

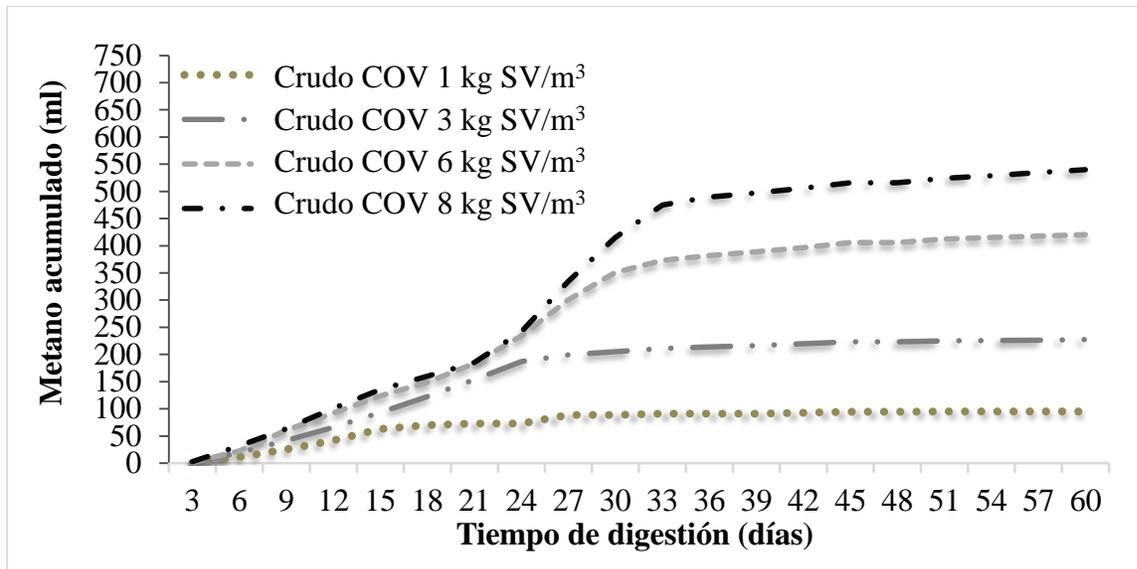


Figura 6. Rendimiento de producción de metano acumulado durante el proceso de digestión anaerobia para el tratamiento de estiércol crudo.

Al tratamiento de estiércol crudo, se realizó el mismo procedimiento de análisis estadístico empleado para el estiércol líquido. Se aplicó una prueba de Shapiro Wilk para comprobar que los datos son normales ($p < 0.05$). Seguidamente se realizó una ANOVA donde el resultado indicó que existe una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre las cuatro cargas. Luego se determinó la mejor carga aplicando un Test Tukey y se obtuvo que la carga orgánica volátil de 1 kg SV/m^3 fue la que tuvo mejor productividad de metano de $0.48 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ ($F=0.249$, $gl=3$, $p=0.68 > 0.05$). Durante el proceso de digestión anaerobia del tratamiento con estiércol crudo se observó que existen dos fases de producción de metano. En la primera etapa ocurrió la descomposición de la fracción insoluble presente en el estiércol, registrando un mayor pico de IPM hasta agotarse la producción de metano. Mientras que en la segunda fase se produjo la degradación de la fracción insoluble (cerdaza), esta provocó que el tiempo de retención hidráulica se alargue hasta lograr la digestión completa del residuo (Figura 7).

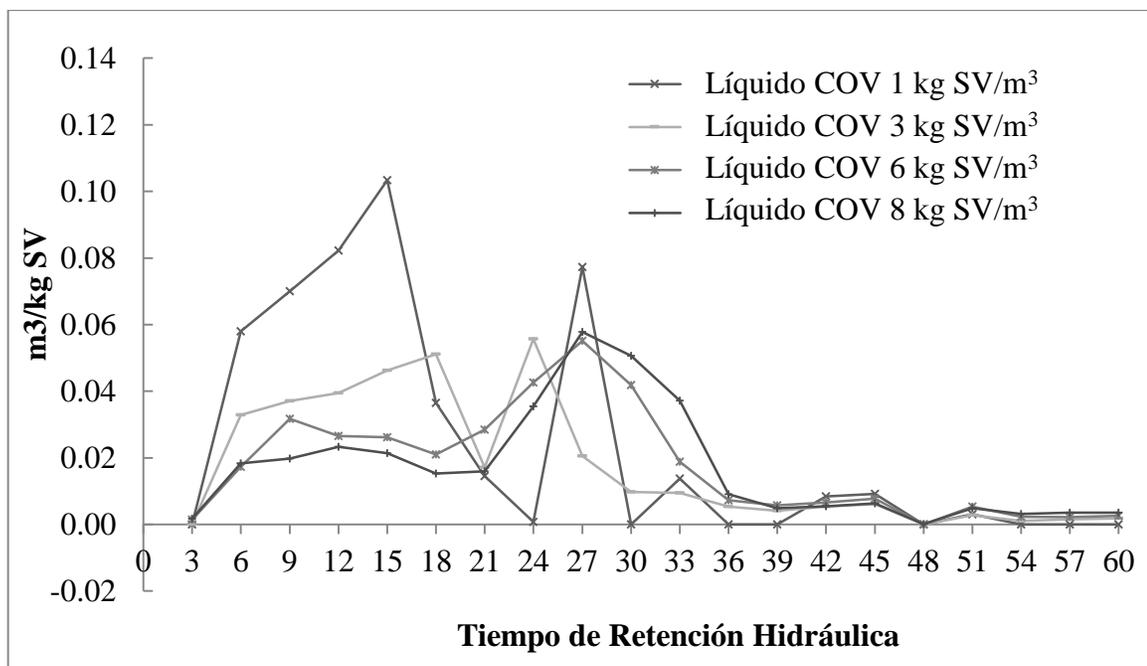


Figura 7. Rendimiento de producción de metano para el tratamiento de estiércol crudo.

Se seleccionó la carga que presentó la productividad más alta de cada tratamiento y se realizó una prueba t-student, para determinar si existe diferencia significativa entre los sustratos aplicados. Se analizó la carga de 1 kg SV/m³ del tratamiento de estiércol líquido y la carga de 1 kg de SV/m³ del estiércol crudo. Se determinó que no existe diferencia significativa entre el tratamiento de estiércol crudo y líquido ($p=0.169 > 0.05$). Sin embargo, el sustrato de estiércol líquido presentó una mayor productividad de metano. La máxima productividad de metano se registró en el día 15 para el tratamiento de estiércol líquido con COV de 1 kg SV/m³ logrando un IPM de 90% hasta el día 24.

El tratamiento de estiércol crudo con COV de 1 kg SV/m³ registró la máxima producción de metano el día 15 hasta el día 24. Sin embargo, ocurrió una segunda fase de producción de metano, donde la fracción insoluble logró descomponerse hasta el día 33 obteniendo el 90% de la productividad. La mayor producción de metano registrada fue el estiércol líquido, esto debido a que contiene únicamente la materia soluble que es aprovechada en la digestión anaerobia mientras que el estiércol crudo está compuesto de la fracción soluble e insoluble y esto disminuye la capacidad de producir metano (Figura 8).

El digestor que se encuentra en funcionamiento en la granja porcina de la EAP, no debe ser alimentado con estiércol crudo, debido a que posee alto contenido de cerdaza. Al ingresar la fracción insoluble al digestor, el residuo permanecerá más tiempo en el sistema hasta que logre la degradación completa de la materia orgánica y esto requerirá un digestor que sea tres veces más grande que el actual. Por tanto, si se desea proporcionar un tratamiento adecuado a los desechos de la granja, el digestor deberá ser cargado únicamente con el estiércol líquido y esto luego de pasar por el proceso de separador de sólidos.

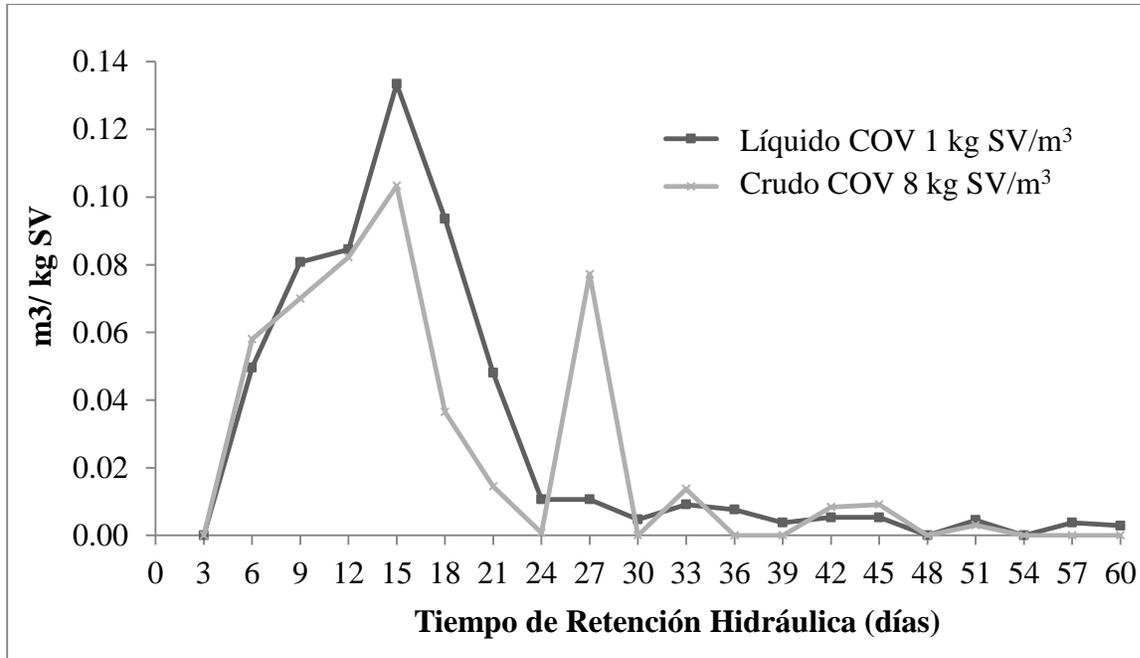


Figura 8. Rendimiento de productividad de metano de los tratamientos de estiércol líquido y estiércol crudo con carga de 1 kg SV/m³.

Eficiencia de remoción de sólidos volátiles. Se analizó la eficiencia de remoción de los Sólidos Volátiles, esto se hizo una vez completado el proceso de digestión anaerobia. El tratamiento de estiércol líquido y estiércol crudo se desempeñaron de mejor manera a cargas de 1 kg SV/m³. Operando a esta carga se registraron eficiencias de remoción de 98.43% en el caso del estiércol crudo y 96.32% en el estiércol líquido. Mientras que las cargas de 3, 6 y 8 kg SV/m³ del estiércol filtrado presentaron una eficiencia de remoción de sólidos volátiles de 93.08, 90.30 y 87.63% respectivamente. Se observó que existe una disminución de la eficiencia de remoción de sólidos volátiles a medida que aumenta la carga orgánica (Figura 9).

El ensayo de estiércol crudo operado a cargas de 3 y 8 kg SV/m³ removieron en 96.67% la concentración de sólidos volátiles y la carga de 6 kg SV/m³ presentó una remoción de 98.43%. El tratamiento de estiércol crudo con una carga de 1 kg SV/m³ presentó el mejor porcentaje de remoción. No obstante, se comprobó que el tratamiento de estiércol líquido presentó una productividad de metano más alto en un TRH menor comparado con el otro tratamiento una eficiencia mayor a 95%. Estos resultados respaldan la selección del sistema operando a una carga de 1 kg SV/m³ con estiércol filtrado para optimizar la producción de metano y remoción de materia orgánica.

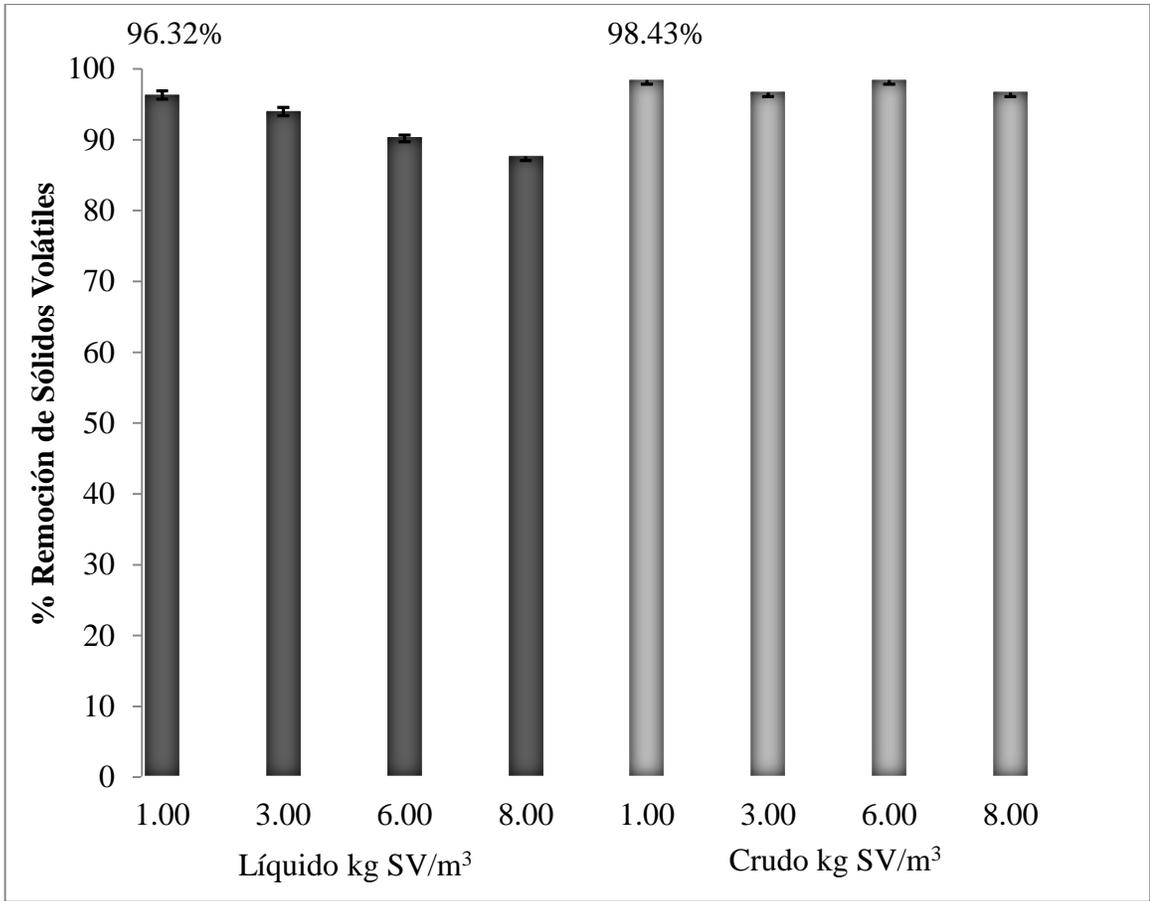


Figura 9. Eficiencia de remoción de sólidos volátiles de los tratamientos empleados.

4. CONCLUSIONES

- La cuantificación del residuo generado en la granja porcina de la EAP fue de 1,347.1 kg de estiércol de cerdo al día, de la cual el 90% proviene de las áreas de engorde 1 y 2 y esto aporta diariamente una carga de 2.66 kg SV/m³ al digestor. El sustrato filtrado de las áreas de engorde 1 y 2 tienen características cualitativas para hacer más eficiente el proceso de digestión anaerobia, sin embargo, el sistema ya se encuentra operando a una carga superior a la óptima.
- La carga máxima que puede ser aplicada al digestor para tener un funcionamiento óptimo es de 1 kg SV/m³ del tratamiento de estiércol líquido, obteniendo un IPM de 0.56 m³/ kg SV en un TRH de 24 días y una eficiencia en remoción de materia orgánica de 96.32%. El estiércol crudo requiere mayor TRH debido a que la cerdaza obstaculiza la digestión anaerobia.
- Para el funcionamiento óptimo del digestor construido en la planta de ganado porcino, no se debe ingresar el estiércol de las áreas de maternidad y gestación, o fracciones que no sean previamente tratadas por el separador de sólidos. Se requiere de una nueva unidad de digestión anaerobia para incorporar la totalidad del residuo generado en la planta de ganado porcino al sistema de tratamiento.

5. RECOMENDACIONES

- Evaluar la aplicación de un pretratamiento para la fracción insoluble del estiércol proveniente de las áreas de maternidad y gestación, que permita la incorporación de este desecho al digestor garantizando reducir el TRH en la fase metanogénica.
- Reducir la carga orgánica volátil que actualmente se está aplicando al digestor, debido a que se está sobre explotando el sistema y puede producir fallos en el proceso de digestión anaerobia.
- Se requiere la construcción de un nuevo digestor para tratar toda la cantidad de estiércol que se produce en la granja de ganado porcino de la EAP.
- Debido a que el estudio se llevó acabo a escala laboratorio, se recomienda realizar investigaciones en campo considerando los parámetros ambientales que afectan el proceso de digestión anaerobia dentro del biodigestor.

6. LITERATURA CITADA

- Acosta, L. Y., y Obaya, A. M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
- American Public Health Association y American Water Works Association. (1965). Standard methods for the examination of water and wastewater.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, L., Guwy, A. J ... van Lier, B. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science y Technology* 59.5 927-934.
- Bidlingmaier, W. (2006). Fifth ORBIT Conference probes anaerobic digestion. *BioCycle Journal of Composting and Organics Recycling*, 47(9), 42-49.
- Borja Padilla, R., Martín, A., Durán Barrantes, M. M., y Maestro Durán, R. (1992). Estudio cinético comparativo del proceso de digestión anaerobia del alpechín en los intervalos mesofílico y termofílico de temperatura.
- Bragachini, M. A., Huerga, A. I., Mathier, D. F. y Sosa, A. N. (2015). Residuos pecuarios: Una problemática que puede transformarse en oportunidad ed electrónico.
- Camacho, A. (2013). Porcina americana desarrolla el biodigestor más grande del país en Cartago. Retrieved from El financiero Costa Rica: [Internet]. Cartago, Costa Rica. Recuperado el 26 de julio de 2016 en http://www.elfinancierocr.com/negocios/Porcina-Americana-desarrolla-biodigestor-Cartago_0_310168981.html
- Cerón, Á., Vidal, A. P., y Lozada, P. T. (2005). Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Scientia et Technica*, 1(27).
- Cevallos, W. K., e Hidalgo, K. L. (2013). Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Francisco Morazán, Honduras.
- Flotats, X., Bonmatí, A., Campos, E., y Antúnez, M. (1999). Ensayos en discontinuo de codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales. Efecto del amonio. *Información tecnológica*, 10(1), 79-85.

- Flotats, X., Campos, E., y Bonmati, A. (1997). Aprovechamiento energético de residuos ganaderos. *Curs d'Enginyeria Ambiental: Aprofitament energètic de residus orgànics* (3: 1997: Lleida). Memorias, 1-21.
- Fregoso, M., Ferrera-Cerrato, R., Barra, J. E., González, G. A., Santos, J. T., Gómez, L. B., y Pérez, G. P. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra*, 19(4), 353-362.
- Galindo Barboza, A. J., Domínguez Araujo, G., Salazar Gutiérrez, G., Arteaga Garibay, R. I., Martínez Peña, M. D.,...Sánchez García, R. (2013). Ensilado de cerdaza, una oportunidad para el manejo de la bioseguridad y el microbismo en granjas porcícolas.
- Guevara Vera, A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. In *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: producción de gas y saneamiento de efluentes*. CEPIS.
- Gujer, W., Zehnder, A., (1983). Conversion processes in anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 15, 127-167.
- Hidalgo, M. D., Del Alamo, J., Hernández, M., & Irusta, R. (2003). Tratamiento de la fracción líquida de purín porcino en reactores anaerobios de lecho fluido. *Ingeniería del agua*, 10(2), 127-133.
- Mariscal, G. (2007). Tratamiento de Excretas Cerdos. Recuperado el 28 de agosto de 2016 en http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_porcina/00produccion_porcina_general/63-excretas_cerdos.pdf
- Molina-Tirado, K. G., Caicedo, L., y Tirado, K. G. M. (1999). Tratamiento de las excretas de cerdo mediante un reactor anaeróbico SCFBR a nivel de banco (No. Doc. 15155) CO-BAC, Bogotá).
- Pozuelo, E. C. (2005). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria (Tesis Doctoral). Universidad de Lleida, España.
- Santolaria, C. y Rebolledo G. (2014) Diseño de un modelo semiempírico de codigestión anaerobia (Tesis Doctoral). Universidad Zaragoza
- Saraz, A. O., Velásquez, J. C. y Sánchez, H. G. (2007). Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60(2), 4145.
- Solano, O. R., Vargas, M. F., y Watson, R. G. (2011). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Revista Tecnología en Marcha*, 23(1), 39.

- Sonesson, U., Björklund, A., Carlsson, M., y Dalemo, M. (2000). Environmental and economic analysis of management systems for biodegradable waste. *Resources, conservation and recycling*, 28(1), 29-53.
- Varnero, M. T. (2011). Manual de biogas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 17 de septiembre de 2016 en <http://www.rlc.fao.org/es/publicaciones/manual-biogás>
- Wilkie, A., Smith, P., y Bordeaux, F. (2004). An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. *Bioresource Technology* 92(24) 103–109.

7. ANEXOS

Anexo 1. Prueba de normalidad para el tratamiento de estiércol líquido.

	COV	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
IPM (m ³ /kg SV)	1.00	.920	3	.453
	3.00	.951	3	.572
	6.00	.984	3	.758
	8.00	.975	3	.698

a Corrección de la significación de Lilliefors

Anexo 2. Prueba de normalidad para el tratamiento de estiércol crudo.

	COV	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
IPM (m ³ /kg SV)	1.00	.881	3	.329
	3.00	.955	3	.592
	6.00	.999	3	.955
	8.00	.873	3	.305

a Corrección de la significación de Lilliefors

Anexo 3. ANOVA para el tratamiento de estiércol líquido.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	.030	3	.010	24.912	.000
Intra-grupos	.003	8	.000		
Total	.033	11			

Anexo 4. ANOVA para el tratamiento de estiércol crudo.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	.037	3	.012	17.137	.001
Intra-grupos	.006	8	.001		
Total	.043	11			

Anexo 5. Prueba de Tukey para el tratamiento de estiércol líquido.

(I) COV	(J) COV	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1.00	3.00	.1141089*	.0163693	.001	.061689	.166529
	6.00	.0806426*	.0163693	.005	.028222	.133063
	8.00	.1295334*	.0163693	.000	.077113	.181954
3.00	1.00	-.1141089*	.0163693	.001	-.166529	-.061689
	6.00	-.0334663	.0163693	.249	-.085886	.018954
	8.00	.0154245	.0163693	.784	-.036996	.067845
6.00	1.00	-.0806426*	.0163693	.005	-.133063	-.028222
	3.00	.0334663	.0163693	.249	-.018954	.085886
	8.00	.0488908	.0163693	.068	-.003529	.101311
8.00	1.00	-.1295334*	.0163693	.000	-.181954	-.077113
	3.00	-.0154245	.0163693	.784	-.067845	.036996
	6.00	-.0488908	.0163693	.068	-.101311	.003529

* La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

Anexo 6. Prueba de Tukey para el tratamiento de estiércol crudo.

COV	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
8.00	3	.431519	.561052 1.000
3.00	3	.446943	
6.00	3	.480410	
1.00	3		
Sig.		.068	

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000

Anexo 7. Prueba de Tukey para el tratamiento de estiércol crudo.

(I) COV_	(J) COV_	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
1.00	3.00	.09949*	.02202	.008	.0290	.1700
	6.00	.12883*	.02202	.002	.0583	.1993
	8.00	.14290*	.02202	.001	.0724	.2134
3.00	1.00	-.09949*	.02202	.008	-.1700	-.0290
	6.00	.02934	.02202	.570	-.0412	.0999
	8.00	.04341	.02202	.274	-.0271	.1139
6.00	1.00	-.12883*	.02202	.002	-.1993	-.0583
	3.00	-.02934	.02202	.570	-.0999	.0412
	8.00	.01407	.02202	.916	-.0564	.0846
8.00	1.00	-.14290*	.02202	.001	-.2134	-.0724
	3.00	-.04341	.02202	.274	-.1139	.0271
	6.00	-.01407	.02202	.916	-.0846	.0564

* La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

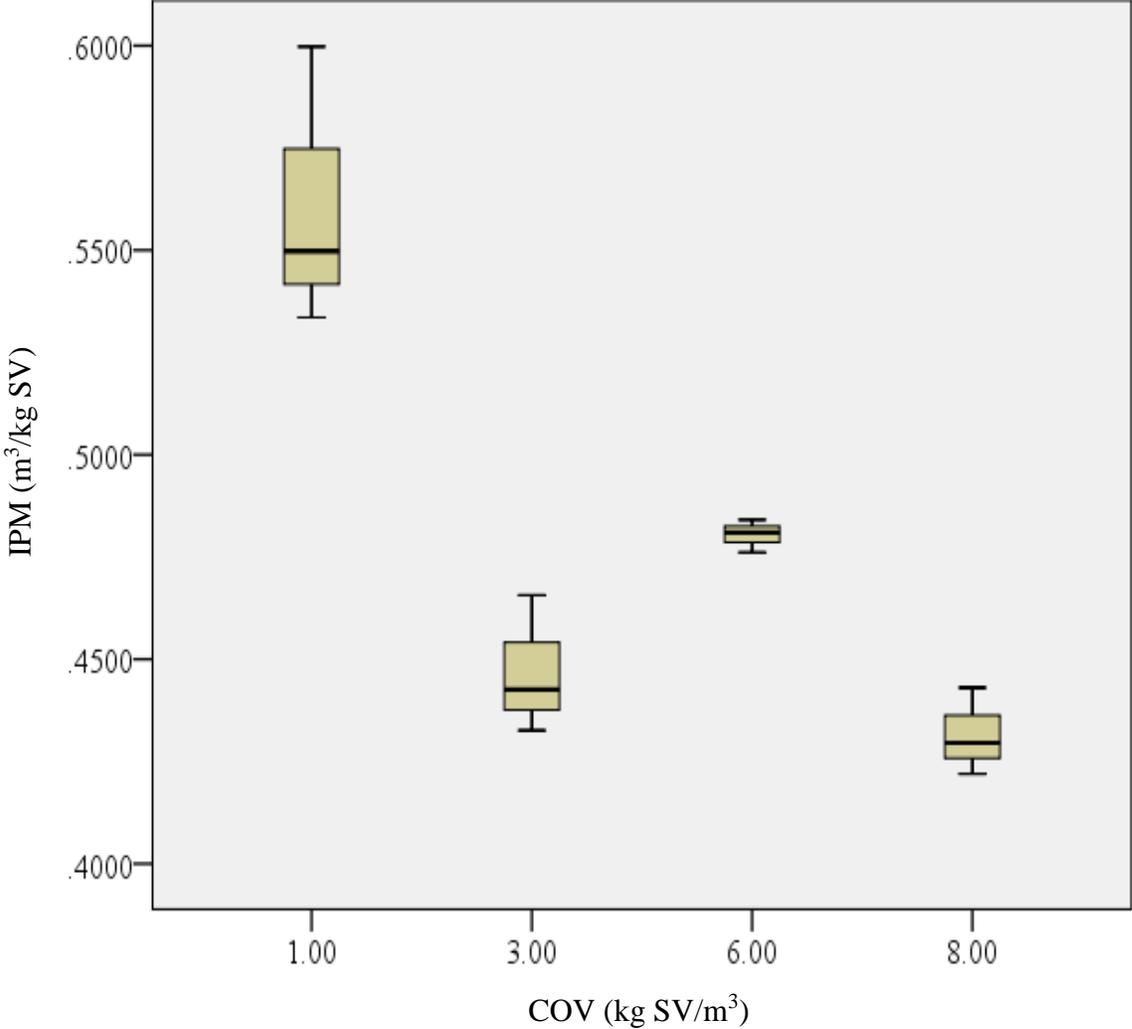
Anexo 8. Prueba de medias de Tukey para el tratamiento de estiércol crudo.

COV_	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
8.00	3	.3340	
6.00	3	.3481	
3.00	3	.3774	
1.00	3		.4769
Sig.		.274	1.000

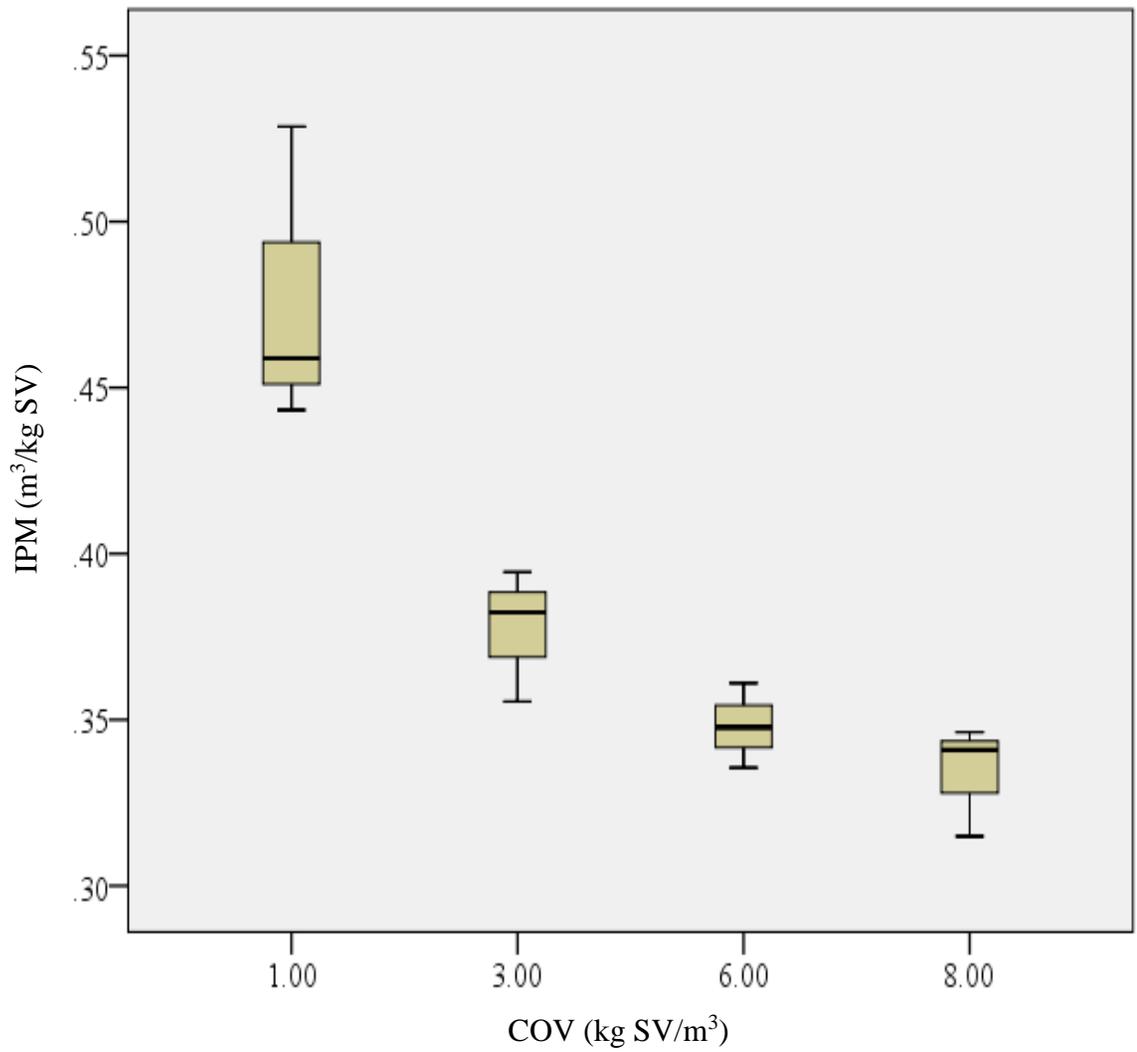
Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 3.000.

Anexo 9. Cuadro de cajas para las muestras de estiércol líquido a las cargas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³.



Anexo 10. Cuadro de cajas para las muestras de estiércol crudo a las cargas de 1, 3, 6 y 8 kg SV/m³.



Anexo 11. Prueba de t-student para el tratamiento de estiércol líquido y estiércol crudo con carga de 1 kg SV/m³.

	Prueba T para la igualdad de medias						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
						Inferior	Superior
Se han asumido varianzas iguales	1.677	4	.169	.07667	.04570	-.05023	.20356
No se han asumido varianzas iguales	1.677	2.760	.200	.07667	.04570	-.07620	.22954