

Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia)*

Andrés Mauricio Enríquez Hidalgo**✉

Mario Alberto Jurado Eraso***

Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Enríquez, A. y Jurado, M. (2016). Análisis del arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio Taiwán en condiciones psicrófilas en el SENA (Nariño-Colombia). *Revista UNIMAR*, 34(1), 243-259.

Fecha de recepción: 24 de noviembre de 2015

Fecha de revisión: 02 de febrero de 2016

Fecha de aprobación: 30 de marzo de 2016

RESUMEN

En este artículo se da a conocer el análisis del arranque y estabilización de un biodigestor como un proceso de producción de biogás. El arranque de este biodigestor consistió en el análisis de un proceso de actividad metanogénica específica (AME) sobre tres lodos anaerobios, con el fin de reconocer la capacidad máxima de metano que se puede producir con un tipo de inóculo específico. Se pudo concluir según análisis estadísticos, que no hay diferencia en utilizar cualquiera de estos 3 lodos, por lo cual se procedió a elaborar un protocolo de inoculación, teniendo en cuenta el caudal de aguas residuales generadas, los parámetros fisicoquímicos de mezcla entre sustrato e inóculo, y posteriormente, haciendo la medición de la eficiencia del biodigestor con la cantidad y calidad de biogás producido en comparación con la literatura técnica.

Palabras clave: Biodigestor anaerobio tipo Taiwán, biogás, condiciones psicrófilas.

Analysis of the starting and stabilization of an anaerobic biodigester under psychrophilic conditions at SENA (Nariño-Colombia)

ABSTRACT

The article presents the analysis of the starting and stabilization of a biodigester, as a biogas production process. The start of this biodigester consisted in the analysis of a specific methanogenic activity process on three anaerobic sludges, in order to recognize the maximum methane capacity that can be produced with a specific type of inoculum, which allowed to conclude, according to statistical analyzes, that there is no difference in using any of them, and proceeded to elaborate an inoculation protocol, taking into account the generated wastewater flow, the physicochemical parameters of the mixture between substrate and inoculum, and then, make the efficiency measurement of the biodigester with the quantity and quality of biogas produced compared to the technical literature.

Key words: anaerobic biodigester type Taiwan, biogas, psychrophilic conditions.

* Artículo Resultado de Investigación. Hace parte de la investigación titulada: *Arranque y estabilización de un biodigestor anaerobio tipo Taiwán en condiciones psicrófilas para la producción de biogás en el Centro Internacional de Producción Limpia (SENA)*, desarrollada desde el 01 de febrero de 2015 hasta el 25 de noviembre de 2015 en el municipio de Pasto, departamento de Nariño, Colombia.

**✉ Ingeniero Ambiental, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: m2112@hotmail.es

*** Ingeniero Químico. Énfasis en Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos; Especialista en Ingeniería Ambiental Área Sanitaria; Magíster en Ingeniería. Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Docente Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: majuradoe@gmail.com

Análise do início e estabilização de um biodigestor anaeróbico Taiwan em condições psicrofílas no SENA (Nariño-Colômbia)

RESUMO

O artigo apresenta a análise de início e de estabilização de um biodigestor, como um processo da produção de biogás. O início do biodigestor consistiu na análise de um processo de atividade metanogênica específica em três lamas anaeróbicas, a fim de reconhecer a capacidade máxima de metano que pode ser produzido com um tipo específico de inoculo. A análise estatística permitiu concluir que não há nenhuma diferença no uso de qualquer um destes três lamas, de modo que passou a desenvolver um protocolo de inoculação, tendo em conta o fluxo de águas residuais gerada, os parâmetros físico-químicos de mistura entre o substrato e inoculo, e em seguida, fazer a medição da eficiência do biodigestor com a quantidade e qualidade do biogás produzido em comparação com a literatura técnica.

Palavras-chave: Biodigestor anaeróbico tipo Taiwan, biogás, condições psicrofílas.

1. Introducción

“El Centro Internacional de Producción Limpia Lope SENA (CIPL), se divide en dos sectores, el sector agropecuario y el sector comercial, el primero de estos está conformado por actividades de ganadería, porcicultura, avicultura, capricultura y la formación académica de los aprendices y sus funcionarios; el sector comercial se dedica a la distribución y venta de los productos derivados de las actividades agropecuarias” (C.P. con J. Gamboa, 2015); estas actividades de desarrollo económico y académico generan continuamente impactos negativos al CIPL y sus alrededores. Por consiguiente, es necesario minimizar los impactos producidos a través de estrategias de prevención y control para generar soluciones aplicadas e integrales desde menor escala que abarquen las actividades que existen en los sectores del CIPL.

En este contexto, la crianza y mantenimiento de porcinos y bovinos genera impactos de tipo atmosférico, hídrico y de suelos (Dirección Ambiental general sectorial, 2002).

El CIPL tiene 116 porcinos; este número varía dependiendo de la venta a externos, además de su natalidad y mortalidad, por lo cual están establecidas medidas de mitigación de impactos como los sitios de acopio, planta de tratamiento de Agua Residual (AR), lavado en seco del estiércol vacuno y porcino, y un lavado con agua de los residuos restantes como medidas de control de aguas residuales.

A este respecto, en CIPL se ha construido un biodigestor anaerobio tipo Taiwán con el fin de producir

biogás y por ende, tratar el AR derivada de la actividad porcicultura. Sin embargo, debido a las condiciones de baja temperatura, donde se ha instalado el sistema y como lo sugiere la literatura técnica, el arranque, estabilización de este tipo de sistemas, es una cuestión de investigación e interés actual, alrededor del mundo (Parra, 2010). Así pues, en esta investigación se pretendió analizar el arranque y la estabilización de este tipo de reactores anaerobios, teniendo en cuenta las condiciones psicrofílas del ambiente, a través de la selección de un inóculo idóneo para la operación del sistema en tales condiciones, así como el procedimiento apropiado para el arranque de este tipo de sistemas.

Dicho lo anterior, esta tecnología es un método de minimización de impactos ambientales, mas no de eliminación total; lleva consigo ventajas como: la disminución de carga contaminante de las aguas residuales porcícolas, además de producción de biogás con alto poder calorífico y de alto costo que puede ser usado como fuente de energía renovable, minimizando costos de operación (Torres, 2012; Fuentes, 2014; Behling, Marín, Castro, Rincón y Colina, 2014; Blumenstein, 2014).

2. Metodología

2.1 Metodología para seleccionar un inóculo con la mayor actividad metanogénica específica bajo condiciones de operación psicrofílas

Actividad Metanogénica Específica (AME). La AME permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios. La AME, ade-

más de ser usada para el monitoreo de la calidad del lodo en reactores anaerobios, es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema, con el fin de examinar la degradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos. Esta herramienta, ampliamente utilizada en diferentes países y desarrollada hace más de dos décadas, no cuenta con un protocolo estandarizado que facilite la comparación de resultados.

Monitoreo de la cantidad y calidad del lodo. Las características cuantitativas del lodo pueden evaluarse con la medición de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles Totales y los aspectos cualitativos con herramientas como la AME, ensayos de sedimentabilidad y perfil de lodos. Por ende, la AME puede definirse como la “máxima capacidad de producción de metano por un grupo de microorganismos anaerobios, realizada en condiciones controladas de laboratorio que permita la máxima actividad bioquímica de conversión del sustrato orgánico a metano” (Aquino, Chernicharo, Foresti, Florencio y Monteggia, 2007, p. 6). El conocimiento de la AME de un lodo permite establecer la capacidad máxima de remoción de DQO de la fase líquida, permitiendo estimar la carga orgánica máxima que puede ser aplicada a un reactor, impidiendo su desestabilización; asimismo, la AME también “permite determinar la concentración mínima de biomasa requerida en el reactor para garantizar la reducción de la carga orgánica aplicada” (Aquino et al., 2007, p. 9).

Para desarrollar el AME es necesario un montaje sencillo, sin mayores requerimientos, como se observa en la Figura 1. Teniendo en cuenta la facilidad de implementar mediciones de AME por el método volumétrico, se enfatizó en este tipo de medición, por su potencialidad de aplicación en el contexto del medio. Por consiguiente, se deben verificar micro fugas en el sistema para obtener un dato representativo de volumen de metano, generado por un lodo anaerobio.

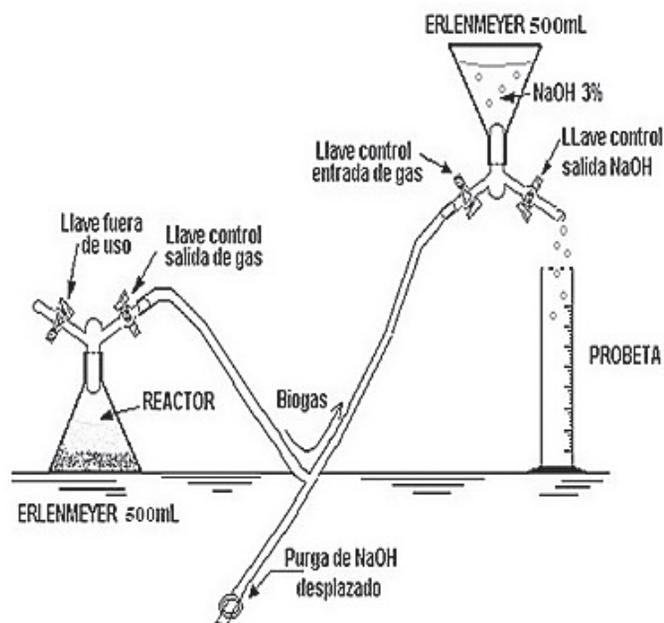
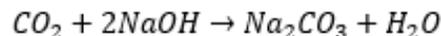
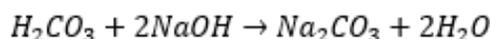
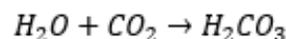


Figura 1. Montaje AME.

Fuente: adaptado de Field (1987), Pérez y Cajigas (2002) y Chernicharo (2007).

El método volumétrico se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH, en un rango de 15 -20 g/L, por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido. Se recomienda chequear que el pH del NaOH sea superior a 12 unidades para garantizar que éste secuestre el CO₂ producido. Las reacciones que se presentan son las siguientes: (Field, 1987).



Inóculo o semilla. “Durante el ensayo AME se asume que el sustrato y los nutrientes estarán presentes en exceso, por lo que la concentración inicial de lodo definirá la duración del ensayo” (Field, 1987, p. 14). Para el ensayo se garantizó agitación, por lo cual se recomiendan concentraciones de inóculo entre 2,0 a 5,0 g SVT/. Además “la concentración seleccionada

de inóculo debe garantizar un volumen no muy elevado para poder garantizar el eficiente contacto entre la biomasa y el sustrato" (Pérez y Cajigas, 2002). El inóculo deberá ser caracterizado previamente en términos de los Sólidos Volátiles Totales (g SVT/L). El volumen de lodo a adicionar se calcula considerando que la mezcla de inóculo y sustrato no debe sobrepasar el 90% del volumen útil del reactor biológico (Elermeyer). El volumen del lodo se calculó a través de la Ecuación 1.

Ecuación 1. Volumen de lodo anaerobio a adicionar.

$$V_{LODO} = \frac{(V_{MEZCLA} * C_{fija})}{(C_{Inicial\ LODO})}$$

Donde.

V_{LODO} = Volumen de lodo a adicionar en el Erlenmeyer (L).

V_{MEZCLA} = Volumen total de reacción o de mezcla (L).

C_{fija} = Concentración fijada (1,0 – 5,0 gSVT/L).

$C_{Inicial\ LODO}$ = Concentración de SVT inicial del lodo (g/L).

Por ende, la potencialidad de usar los ensayos de AME como herramienta para evaluar diferentes inóculos en la tratabilidad de un agua residual industrial, facilita la selección del inóculo más adecuado para el tratamiento.

Sustrato. El ensayo de AME debe ser realizado con exceso de sustrato y nutrientes para lograr que la cinética de degradación se aproxime a una reacción de orden cero, pasando a depender solo de la concentración de microorganismos presentes en el inóculo (Díaz, Espitia y Molina, 2002).

Temperatura. Teniendo en cuenta que los microorganismos metanogénicos tienen mejores condiciones de crecimiento entre 30 y 35°C, es recomendable el uso de un cuarto de calentamiento con temperatura controlada que garantice una temperatura estable dentro del rango indicado anteriormente (Field, 1987; Pérez y Cajigas, 2002 y Chernicharo, 2007).

Producción de metano y cálculo de la AME. La producción teórica de metano debe ser calculada teniendo en cuenta las condiciones de temperatura y presión atmosférica bajo las cuales son realizados los montajes de AME.

Considerando la ecuación de combustión del metano, teniendo una oxidación completa de éste, una

mol de CH_4 consume dos moles de O_2 . Por lo tanto, a condiciones normales de temperatura y presión ($T=273^{\circ}K$; $P=1atm$), 22.4 litros de metano corresponden a 64 g de DQO, es decir, 0.35 litros de CH_4 por gramo de DQO removida. Esta relación permite estimar la fracción de materia orgánica convertida en metano a partir del volumen de metano producido en el reactor, por unidad de tiempo. Como esta relación es válida para condiciones normales de temperatura y presión, para cualquier otra condición el volumen obtenido debe ser corregido. El factor de corrección por temperatura y presión puede calcularse con la Ecuación 2 (Penna, 1994).

Ecuación 2. Factor de corrección por temperatura.

$$K(t) = \frac{P * K}{R * (273 + t)}$$

Donde:

$K(t)$ = Factor de corrección (g DQO/L).

P = Presión atmosférica (atm).

R = Constante de los gases (0.08206 atm*L/mol*K).

K = Carga orgánica digerida correspondiente a un mol de CH_4 (64 g DQO/mol).

T = Temperatura operacional del montaje ($^{\circ}C$).

Además, para hallar los gramos de DQO_{CH_4} removida y convertida en metano se utiliza la Ecuación 3.

Ecuación 3. Gramos de DQO removida convertida en metano.

$$g\ DQO_{CH_4} = (DQO\ inicial - DQO\ final) * 1\ litro$$

Por ende, el volumen teórico de metano producido es calculado con la Ecuación 4.

Ecuación 4. Volumen teórico de metano producido.

$$V_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$$

Donde.

V_{CH_4} = Volumen teórico de metano producido (L).

DQO_{CH_4} = Carga de DQO removida en R1 y convertida en metano (g DQO).

Posterior a esto, se hace un seguimiento de NaOH desplazado diariamente, hasta que los valores de

líquido se tornen constantes, con el fin de obtener una pendiente máxima en una curva de producción (volumen acumulado CH_4 vs. tiempo), además para efectuar el cálculo de la actividad metanogénica específica se aplica la Ecuación 5.

Ecuación 5. Cálculo de la actividad metanogénica específica.

$$AME \left(\frac{gDQO}{gSVT} * dia \right) = \frac{m * 24}{V_{CH_4} * M}$$

Donde:

AME = Actividad metanogénica específica $\left(\frac{gDQO}{gSVT} * dia \right)$.

24 = Factor de conversión de horas a días.

V_{CH_4} = Volumen teórico de metano producido (L).

m = Pendiente en la curva de producción.

M = Masa de lodo (Volumen de lodo*SVT lodo).

2.2 Metodología para establecer un protocolo para la inoculación de un biodigestor anaerobio tipo Taiwán construido en el CIPL (SENA).

En el arranque del biodigestor anaerobio, el inicio está caracterizado por una baja actividad biológica, relacionada con el crecimiento de las bacterias acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas como biomasa dispersa y adherida. Tradicionalmente, el arranque es la etapa considerada más inestable y crítica en el proceso anaerobio, por lo que debe iniciarse con tiempos de retención hidráulicos (TRH) elevados, “para asegurar una buena asimilación del sustrato por parte de las bacterias y mantener una carga orgánica inicial baja, la cual puede ir aumentando a medida que el reactor se estabiliza” (Hulshoff, 1987). Durante el arranque y operación de los reactores anaerobios se recomienda el seguimiento de algunos parámetros fisicoquímicos y el uso de herramientas que permitan evaluar su desempeño. Los parámetros ambientales y de control son variables que pueden afectar, mejorar o inhibir, el funcionamiento del proceso de digestión anaerobia (Aquino et al., 2007). En primer lugar, las altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones de metano, aunque también aumenta el riesgo de so-

brecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor, provocando un descenso del pH y el posible que falle el sistema. El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. El nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles son inhibidores importantes de las bacterias metanogénicas, así como los metales pesados a altas concentraciones. Este tipo de sustancias pueden encontrarse como componentes del sustrato de alimentación o como subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos del reactor.

Uno de los sistemas de control es la concentración de ácidos grasos volátiles, productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico, ya que pueden indicar evolución del proceso por su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Por tanto, un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, siempre significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás. Además, otro compuesto intermedio importante del proceso anaerobio es el hidrógeno. Su acumulación en el medio, puede provocar la inhibición de la acetogénesis, es decir, la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono (Aquino et al., 2007). Así mismo, durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales, este es importante para el crecimiento bacteriano, pero una concentración excesiva puede limitar su crecimiento; este es el resultado de la suma de ion amonio y del amoniaco, su concentración relativa de cada una depende del pH, la que parece inhibir el proceso de digestión anaerobia es el amoniaco libre, ya que se ha comprobado experimentalmente que el efecto inhibitorio por amonio aumentará a pH alcalinos (Aquino et al., 2007).

La cantidad de amoniaco libre depende de la concentración del sustrato, de la relación carbono/nitrógeno, de la capacidad tamponadora del medio y de la temperatura de digestión (Aquino et al., 2007). Otro inhibidor es la presencia de elevadas concentraciones de sulfato, en el sustrato se puede afectar la etapa de la metanogénesis, ya que en presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras, haciendo así una competición que determinara la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido (Aquino et al., 2007).

El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos. En general, los metanogénicos son más sensibles que los ácidogénicos y acetogénicos, comenzando a ser tóxica una concentración de 50mg/l si los microorganismos metanogénicos no están aclimatados a los sulfuros. Por lo que, la inhibición se favorece a pH bajos y a bajas temperaturas (Aquino et al., 2007). Por tanto, la inhibición tiene dos etapas, la primera debida a la competición por el sustrato entre los microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda, es una inhibición directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles. Por otra parte, los cationes y metales pesados alcalinos pueden provocar toxicidad a los microorganismos a partir de un nivel de concentración, generando la disminución de la velocidad de crecimiento, que aumenta con el peso molecular. El orden de toxicidad de los metales pesados es: Ni>Cu>Cr=Cr>Pv>Zn (Aquino et al., 2007).

Por último, “se debe asegurar una adecuada mezcla del contenido del biodigestor, esta es esencial y persigue los siguientes objetivos” (Perrigault, Weatherford, Martí-Herrero y Poggio, 2012, p. 259), poner en

contacto el sustrato fresco con la población bacteriana y eliminar los metabolitos producidos por los microorganismos metanogénicos al favorecer la salida de los gases; proporcionar una densidad uniforme de población bacteriana y por ende, prevenir la formación de espumas y sedimentación en el biodigestor, también previene la formación de espacios muertos que reduce el volumen efectivo del reactor, y por último, eliminar la estratificación térmica manteniendo la temperatura uniforme en todo el reactor.

En conclusión, para arrancar y estabilizar los sistemas de biodigestores anaerobios, se debe tener en cuenta los parámetros fisicoquímicos del agua residual porcícola, con el fin de verificar si cumplen con condiciones óptimas para que se lleve a cabo la digestión anaerobia que ingresa al sistema (sustrato), medir la cantidad de inóculo que se utiliza para acelerar la producción de biogás, además de la medición de la cantidad de caudal de agua residual porcícola que ingresa el sistema. Las condiciones óptimas del proceso se pueden observar en la Tabla 1.

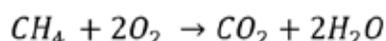
Tabla 1. *Condiciones óptimas para el proceso anaerobio*

Parámetro	Condición
Eficiencia	SST, (DQO), (DBO) y organismos patógenos
Estabilidad	pH, AGV, Alcalinidad, Composición del biogás
Bacterias	Equilibrio dinámico entre no metanogénicas y metanogénicas
Temperatura	Intervalo mesofílico= 29-38°C Intervalo termófilo= 49-57°C
Medio	Anaerobio, OD = 0
Nutrientes	N,P, trazas de Ca, Mg, Fe, K, Ni, Co
DBO/N/P/S = 800/7/1/1	Para residuos con DQO > 2500 mg/L
DBO/N/P/S = 300/7/1/1	Para residuos con DQO < 2500 mg/L
pH	7,0 -7,2 (6,6-7,6) (pH >6,2)
Composición del gas	65% - 70% de metano
Producción de gas	Anaerobio, OD = 0
Alcalinidad	1000 -5000 mg/L.
Ácidos volátiles	< 500 mg/L- Ácido acético

Fuente: adaptado de Amarral (2008), Bouallagui (2003), Botero (1987), Elías, Campos y Flotats (2012), Rittmann (2001) y Sanz (2015).

2.3 Metodología para determinar la eficiencia del biodigestor en la etapa de arranque y estabilización en condiciones psicrófilas

La producción y conversión de metano en el proceso anaerobio, es función de la cantidad de materia orgánica estabilizada; el metano es poco soluble y su pérdida de la solución representa remoción de materia orgánica. Para la conversión completa de metano a dióxido de carbono más agua, se requiere oxígeno. La demanda de oxígeno del metano está dada por la siguiente reacción (Romero, 2010):



Por tanto, un mol de metano es equivalente a dos moles de oxígeno, o 16kg de metano requieren 64kg de oxígeno, lo cual quiere decir que en la estabilización anaerobia de 1kg de DBOU en condiciones anaerobias sería:

$$v = \frac{0,25kg}{16 * 10^{-3} \left(\frac{kg}{mol}\right)} * 22,4 \frac{l}{mol} = 350l$$

En conclusión, 1kg de DBOU estabilizada anaeróticamente e igual a $0,35m^3$ de CH_4 o se interpreta diciendo que 1kg de DQO removida anaeróticamente, produce $0,35m^3$ de CH_4 . Cualquier reacción o condición que impida la formación de metano produce una reducción de la eficiencia en remoción de DBO en el proceso anaerobio. Una de las reacciones que compiten con la metanogénesis, es la reducción de sulfatos a sulfuros por las bacterias reductoras de sulfato, esta reducción consume DBOUC, que sería convertida en metano. Existe una proporción alta de materia orgánica/sulfatos, la reacción procede hasta los sulfuros, cuando el es completamente reducido a sulfuros cuando SO_4 , se consumen 2g de DBOUC/g de SO_4 , por tanto, la presencia de bacterias reductoras de sulfatos y la consecuente respiración del sulfato afectan adversamente la metanogénesis, ya que las bacterias metanogénicas no toleran el ácido sulfúrico.

Para determinar la eficiencia de producción de biogás del biodigestor tipo Taiwán en la etapa de arranque y estabilización, la medición de volumen de biogás en el sistema, presión de biogás a la cual está sometido y composición de este, son variables

que tiene como fin conocer el caudal biogás que se puede aprovechar para su posterior combustión. Cabe resaltar que los biodigestores anaerobios tipo Taiwán tienen presión baja, lo que indica que si no hay presión suficiente para que los biodigestores se inflen completamente, el biogás no podrá extraerse (Aquino et al., 2007). Por otro lado, se debe tener en cuenta la calidad del biogás dependiendo del porcentaje de metano, conservando una superioridad del 50% del total de biogás producido (Bernal, 2012).

3. Resultados

3.1 Seleccionar un inóculo con la mayor actividad metanogénica específica bajo condiciones de operación psicrófilas. El montaje del test AME realizado es un método volumétrico, por lo cual se presentaron porcentajes de error que fueron necesarios de minimizar; la explicación de esto se debe a las microfugas presentadas en el montaje que causan margen de error en la cuantificación del volumen de CH_4 . Dicho esto, se seleccionaron 3 tipos de lodos anaerobios que debido a sus condiciones de temperatura y de caracterización anaerobia optimizan el proceso en el biodigestor, además cabe destacar que para cada test AME se realizó el montaje tres veces para minimizar el margen de error para cada lodo. Por consiguiente, se presentan los tres lodos anaerobios escogidos y el resultado de estos en la Tabla 2 y su seguimiento en las figuras 2, 3 y 4 respectivamente; cabe destacar que, no se analizó la fase de decaimiento del NaOH debido a que dejó el ensayo para cuando las curvas se tornen asintóticas (Torres, 2012).

Lodo anaerobio Frigovito. Para obtener este lodo se hizo una visita a la planta de sacrificio Frigovito ubicada en el corregimiento de Jongovito, el cual se encuentra ubicado a 4Km de la ciudad de Pasto; una vez obtenida la muestra de lodo se procedió inmediatamente a hacer una caracterización de sólidos volátiles totales (SVT) para calcular el volumen del lodo que fue necesario para el test AME.

Porquinaza. La caracterización de la porquinaza es un punto clave, ya que en el CIPL, genera alrededor de 30 kg/día, por lo cual utilizar este tipo de inóculo es factible por el aprovechamiento de residuos sólidos generados por la porcicultura, la caracterización pretende como en el anterior caso, conocer el volumen de inóculo que se tendrá que utilizar para el test AME.

Microorganismo eficiente generado en la planta de bioindustrialización en el CIPL. El microorganismo eficiente es una especie que conforma un cultivo mixto de microorganismos benéficos, obtenidos de ecosistemas naturales y seleccionados por sus efectos

positivos en los cultivos. Fueron obtenidos en la Universidad de RyuKyu en Okinawa, Japón, a comienzos de los años ochenta, por el profesor Teruo Higa.

Tabla 2. Valores de AME para cada lodo en tres pruebas

AME g DQO / g SVT)*día)			
Lodo	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Frigovito	0,105	0,115	0,084
Microorganismo eficiente	0,127	0,116	0,092
Porquinaza	0,079	0,096	0,105

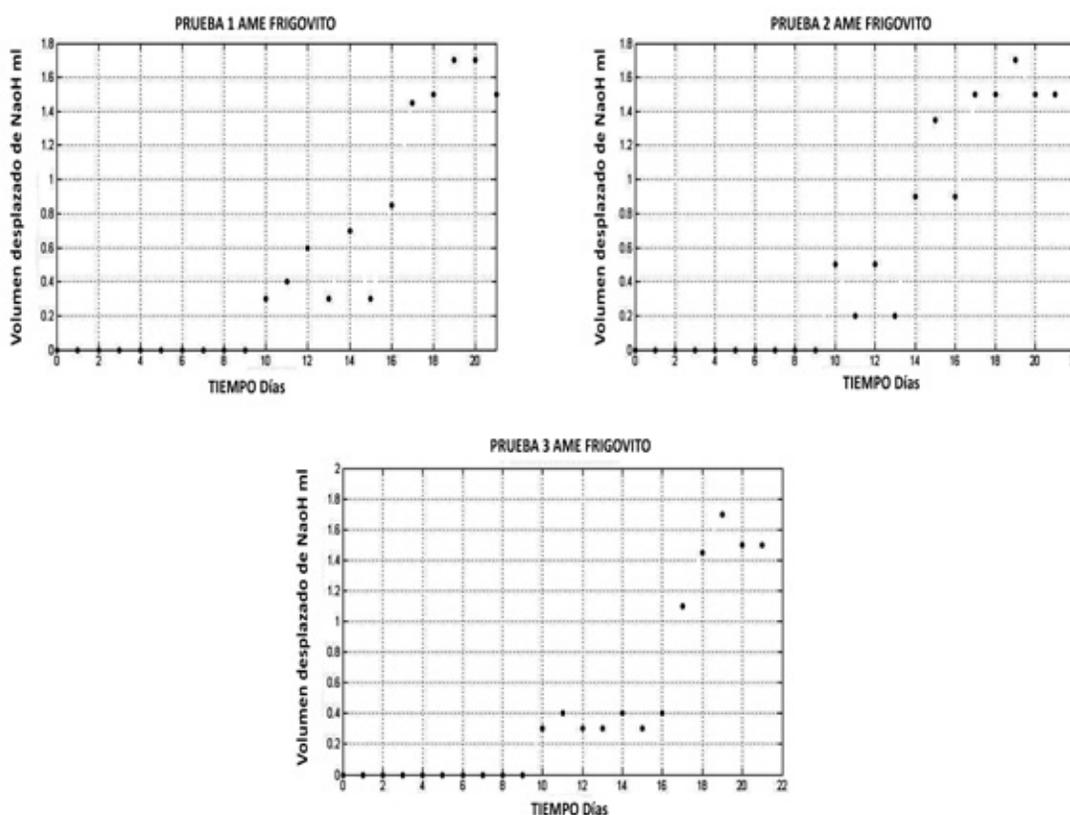


Figura 2. Comportamiento del lodo anaerobio Frigovito durante el test AME.

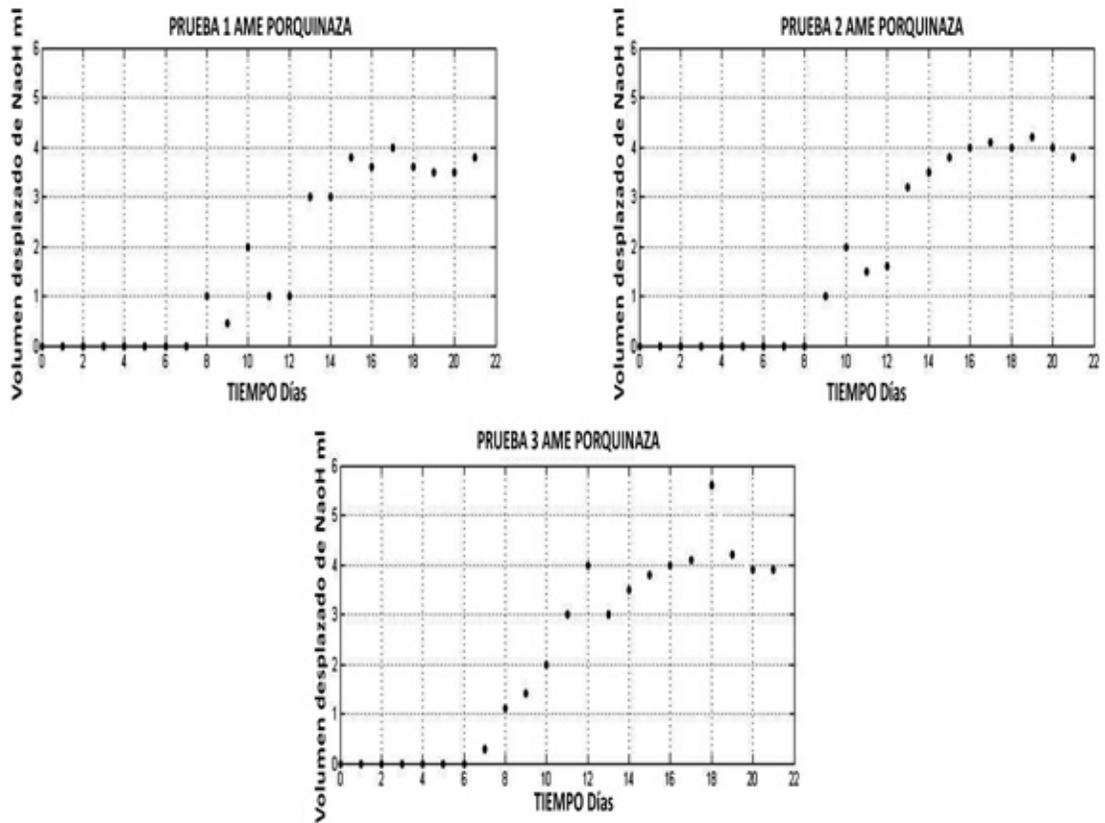


Figura 3. Comportamiento de la porquinaza durante el test AME.

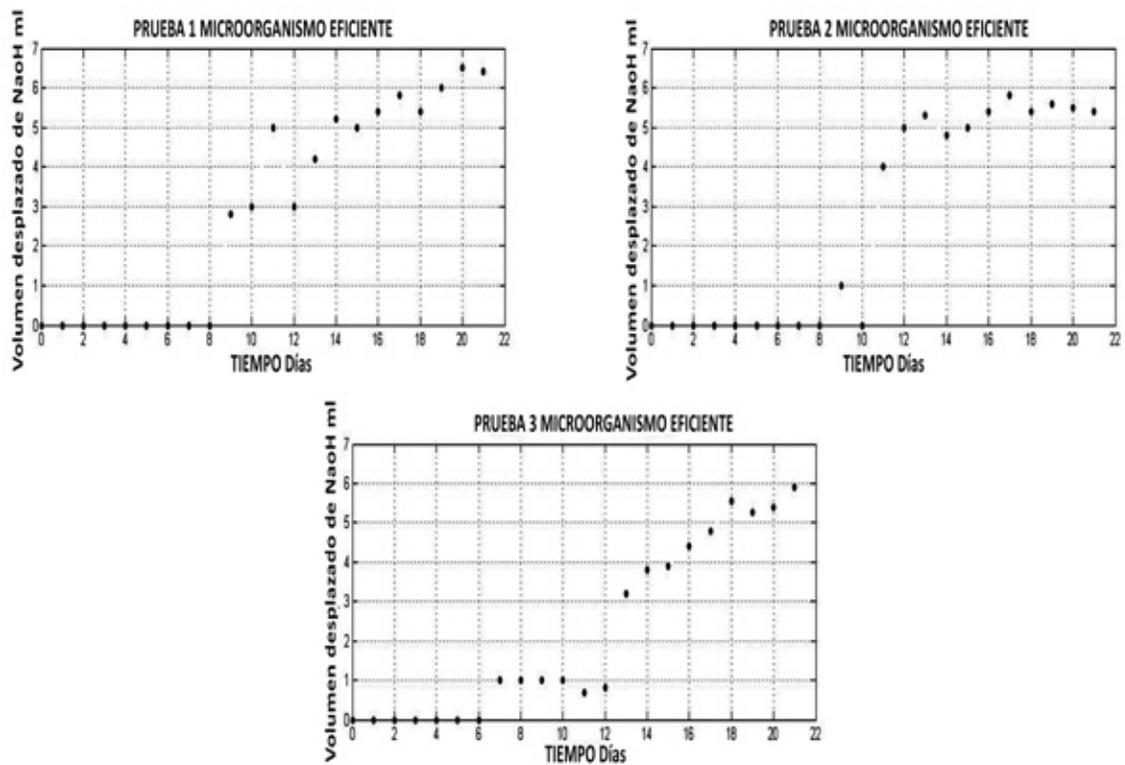


Figura 4. Comportamiento del microorganismo eficiente durante el test AME.

3.2 Establecer un protocolo para la inoculación del biodigestor anaerobio tipo Taiwán. El protocolo se define en el siguiente diagrama de flujo.

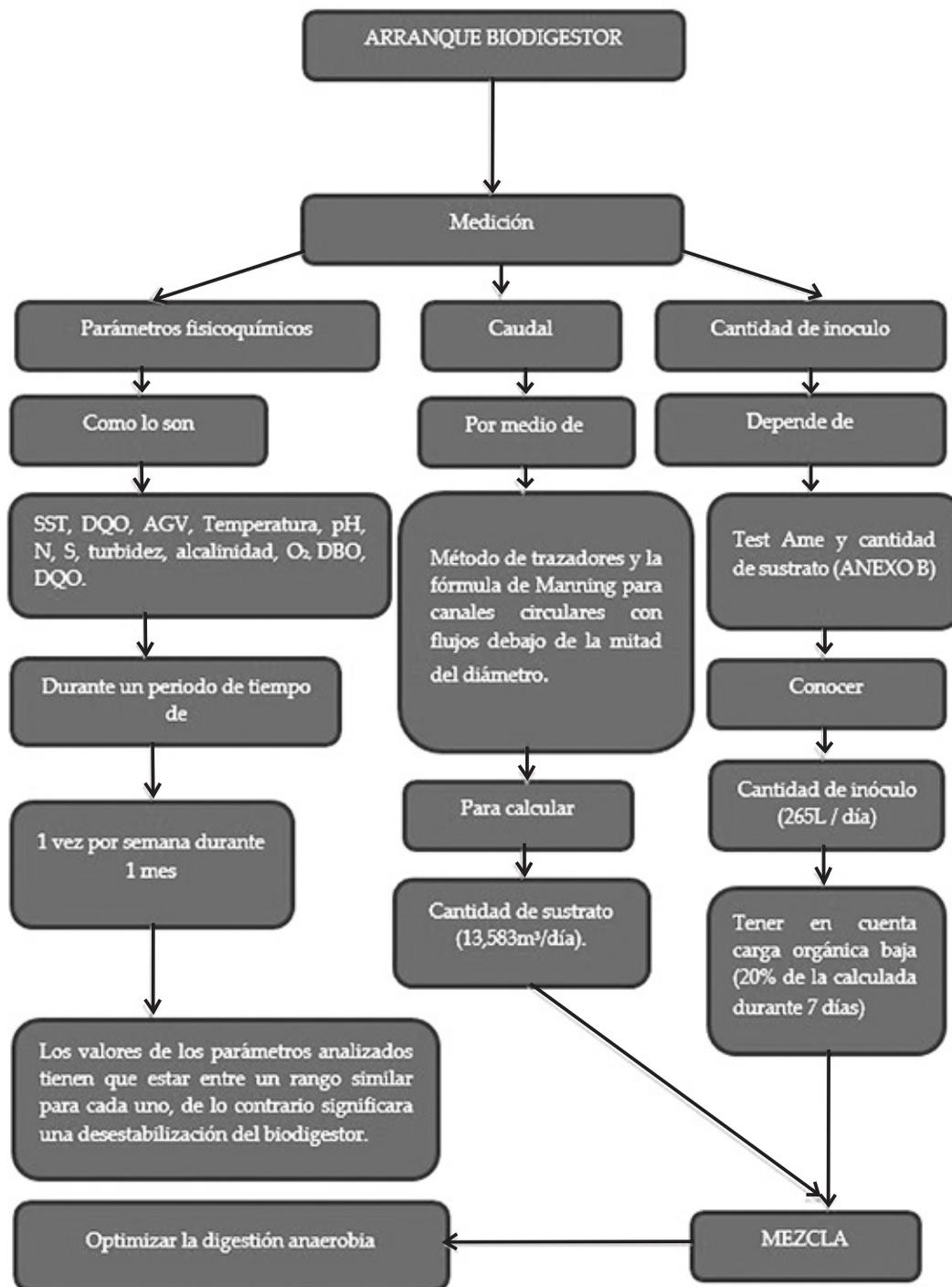


Figura 5. Diagrama de flujo.

Los resultados de la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua residual porcícola se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. *Parámetros fisicoquímicos aguas residuales porcícolas*

Parámetro	Método	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
SST (mg/L)	Gravimétrico	1416,66	1713,33	2000,4	2156,5
PH	PH metro	7,61	7,94	8,41	8,75
AGV (meq/L)	Titulación	24,8	22,1	20,5	18,9
Alcalinidad(mg/L)	Titulación	957,8	905	1005,4	1324,4
O ₂ (mg/L)	Titulación	0,045	0,036	0,029	0,041
DQO (mg/L)	Fotometría	130548,6	154780,4	123964,2	99457,54
DBO (mg/L)	Titulación	19546,45	24845,48	19478,7	18456,4
Nitrógeno total(mg/L)	Titulación	760,16	780,15	846,45	775,45
Sulfatos(mg/L)	Gravimétrico	31,868	36,4	56,45	47,49

La Ecuación 6 describe cómo calcular el volumen de mezcla en un biodigestor anaerobio tipo Taiwán.

Ecuación 6. Volumen de mezcla biodigestor anaerobio tipo Taiwán.

$$Vm = VTb * 30\%$$

Donde:

Vm = Volumen de mezcla (m³).

VTb = Volumen total del biodigestor (m³).

30% = Porcentaje de sustrato más inóculo presente en el biodigestor.

La concentración fijada es de 3,5g SVT/L, además se toma el valor de SVT de los microorganismos eficientes. Dicho esto, según la Ecuación 1, es necesario inocular el sistema con 265 litros de microorganismos eficientes al día, con el fin de mejorar condiciones de digestión anaerobia y por ende, mejorar la calidad y cantidad de biogás producido. Cabe destacar que el proceso de arranque del biodigestor es la etapa más inestable del proceso de digestión anaerobia, por ende, para asegurar una asimilación adecuada del sustrato por parte de las bacterias (inóculo) se mantuvo una carga orgánica inicial baja (50 litros de microorganismos eficientes durante los primeros 7 días); posterior a esto se, fue aumentando en un intervalo de 100 litros de microorganismos eficientes hasta llegar a los 265 litros.

3.3 Determinar la eficiencia del biodigestor en la etapa de arranque y estabilización en condiciones psicrófilas en el CIPL. En este contexto, se realizó la toma de la muestra de biogás para su posterior análisis cromatográfico como lo indica la Figura 6. El análisis cuantitativo de estos picos da como resultado el porcentaje de cada componente que conforma el biogás; la altura de los picos se obtiene conectando la línea de base de cada lado del pico por medio de una línea recta, midiendo la distancia perpendicular entre esta línea y el pico. Por lo cual, se tiene como el 100% las 200 unidades en el eje Y, y posterior a esto, realizamos una regla de 3 relacionando las alturas (CH₄ = 158 unidades en Y), (H₂S = 12,5 unidades en Y) y (CO₂ = 28 unidades en Y) de obtenidas en cada pico para hallar el porcentaje. Los porcentajes obtenidos de metano = 79%, ácido sulfhídrico = 6,25%, dióxido de carbono = 14% (Espíndola, 2011).

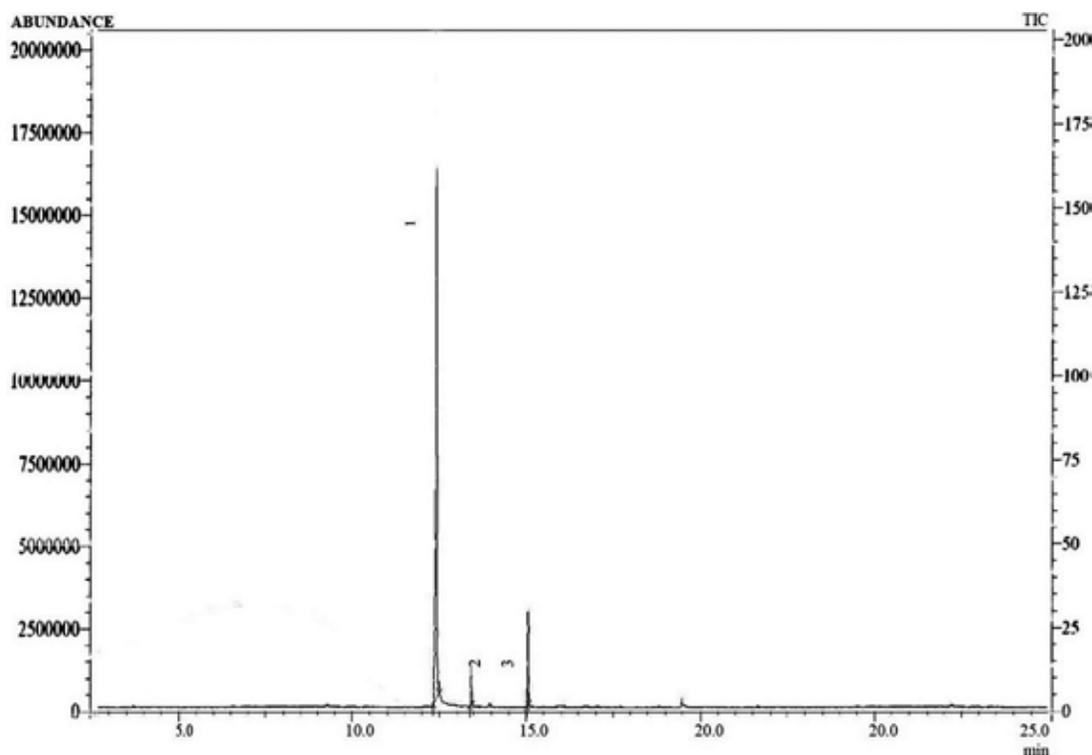


Figura 6. Análisis cromatográfico de biogás.

Posterior a esto, se calculó la masa molecular del biogás teniendo en cuenta el porcentaje de componentes analizados del biogás (metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico), además del peso molecular de cada uno de estos componentes para aplicar la Ecuación 7.

Ecuación 7. Masa molecular de biogás.

$$Mmb \left(\frac{kg}{mol} \right) = (\%CH_4 * PmCH_4) + (\%CO_2 * PmCO_2) + (\%H_2S * PmH_2S)$$

Donde:

MmB = Masa molecular biogás (kg/mol).

$\%CH_4$ = Porcentaje de metano en el biogás (%).

$PmCH_4$ = Peso molecular del metano (kg/mol).

$\%CO_2$ = Porcentaje de dióxido de carbono en el biogás (%).

$PmCO_2$ = Peso molecular del dióxido de carbono (kg/mol).

$\%H_2S$ = Porcentaje de ácido sulfhídrico en el biogás (%).

PmH_2S = Peso molecular de ácido sulfhídrico (kg/mol).

Dicho esto se procedió a calcular la masa molecular del biogás.

$$\left(79\% * 0,016 \frac{kg}{mol} \right) + \left(14\% * 0,044 \frac{kg}{mol} \right) + \left(6,25\% * 0,034 \frac{kg}{mol} \right) = 0,021 \frac{kg}{mol}$$

Teniendo en cuenta el volumen del biodigestor descrito en la Tabla 4, se puede obtener el parámetro de presión en el sistema.

Tabla 4. *Parámetros de diseño biodigestores*

Parámetro	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Total
Longitud	15m	15m	30m
Diámetro	1m	1m	2m
Volumen total biodigestor	11,781m ³	11,781m ³	23,562 m ³

Dicho esto, el biogás tiene una densidad de 1,08 kg/m³ y en los biodigestores anaerobios ocupa del 60 al 70% del volumen total del biodigestor, por lo cual se procedió a encontrar la masa de biogás en el sistema con un 70% del volumen total del sistema con la Ecuación 8.

Ecuación 8. Masa del biogás producido en el sistema.

$$\text{Masa de biogas (kg)} = (V_{tr} * 0,7) * \rho$$

Donde:

V_{tr} = Volumen total reactor (m³).

ρ = Densidad del biogas. (kg/m³).

$$\text{Masa de biogas (kg)} = (23,562\text{m}^3 * 0,7) * 1,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 17,813 \text{ kg}$$

Posterior a esto, se calcularon las moles reales del biogás en el sistema con la Ecuación 9.

Ecuación 9. Moles de biogás.

$$\text{Moles de biogas} = \frac{\text{masa del biogas (kg)}}{\text{masa molecular biogas}(\frac{\text{kg}}{\text{mol}})} = \frac{17,813 \text{ kg}}{0,021 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 848,24 \text{ moles}$$

Después se calculó la presión barométrica, con una temperatura promedio interna de 28,25°C con la Ecuación 10.

Ecuación 10. Presión manométrica biogás (gases ideales).

$$P_{\text{manometrica biogas}} = \frac{848,2 \text{ mol biogas} * 0,0821 \frac{\text{l} * \text{atm}}{\text{k} * \text{mol}} * 301,4 \text{ k}}{16493,4 \text{ l}} = 1,271 \text{ atm}$$

Por ende, se halló la presión absoluta del biogás en el sistema que será igual a la presión atmosférica más la presión manométrica como lo describe la Ecuación 11.

Ecuación 11. Presión absoluta del biogás.

$$P \text{ absoluta} = 0,742atm + 1,271atm = 2.013 atm \text{ presión de salida del biogás}$$

Debido a la alta presión que se presenta en el sistema (2,013 atm), el biogás generado se tuvo que quemar diariamente en un periodo de 10 a 15 minutos con el fin de evitar que el aumento de esta presión provoque estallidos o fugas en el sistema; además, se pudo observar que este periodo es el promedio para que los biodigestores disminuyan su presión y por ende, que la digestión anaerobia retome la producción de biogás en el día siguiente.

4. Discusión

Los valores del test AME para cada lodo demostraron que se debe hacer un experimento unifactorial de efectos fijos completamente al azar, a través de una prueba no paramétrica (*Kruskal Wallis*), con un 95% de confianza. Al realizar esta prueba estadística, se obtuvieron dos hipótesis, las cuales giran en torno a la variable de agrupación de inóculo llamada "significancia" (p). Si esta es mayor a 0,05 se acepta la primera hipótesis (no hay diferencia al utilizar cualquiera de los 3 tipos de inóculos escogidos en la investigación); y si esta es menor a 0,05 se acepta la segunda hipótesis (hay diferencia al utilizar los 3 tipos de inóculos escogidos).

Los resultados arrojados por el test dan una significancia (p) de 0,393 por lo cual se aceptó la primera hipótesis, y se seleccionó el inóculo de preferencia que el investigador consideró, que en este caso fue el microorganismo eficiente.

Dicho esto se pudo realizar un protocolo de inoculación que en un fin fue necesario para controlar el proceso anaerobio y por ende, tener una buena producción de biogás; en este mismo sentido, la Tabla 5 representa las relaciones más importantes de los parámetros evaluados durante las cuatro semanas de seguimiento del biodigestor.

Tabla 5. Relaciones de control en el biodigestor y su réplica

Relación Establecida	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
DBO/N/S=800/7/1	800/31/1,3	800/25/1,5	800/35/1,5	800/34/1,6
AGV/alcalinidad > 0,8	0,026	0,014	0,020	0,024

Como se puede observar, la relación DBO/N/S no cumple con los estándares establecidos según la literatura técnica para una DQO > 2.500 mg/L, debido a los valores del nitrógeno total exceden en un promedio de 4,5 veces más al establecido; este es importante para el crecimiento bacteriano, pero una concentración excesiva puede limitar el crecimiento; se puede explicar este desfase de relaciones debido a que el sistema trabaja a un pH que tiende a ser más alcalino que ácido.

Además, se puede confirmar esto debido a la relación AGV/ alcalinidad. Ya que en las 4 semanas de seguimiento las relaciones se mantuvieron por debajo del valor de 0,8, por lo cual el sistema no tendrá posibilidades de trabajar en un medio ácido si no alcalino, lo cual es bueno en parte, ya que un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás, pero la alcalinización también puede causar inhibición, ya que al aumentar el pH se va a favorecer la formación de amoníaco (por lo cual se explica un aumento del N en la relación) que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano ya mencionado.

Dicho lo anterior, fue necesario hacer seguimiento del pH para controlar el aumento de nitrógeno amoniacal

y por ende, la inhibición en la digestión anaerobia que no supere el valor de 8, que en este caso, para las semanas 3 y 4 no cumple con este ítem y como se observa en estas semanas, la alcalinidad también aumentó. Por ello, se hace necesario reducir la periodicidad de inoculación en el sistema; por último tenemos los sulfatos, que según la literatura técnica, valores entre 0 y 50mg/L aseguran una óptima digestión anaerobia, y que en este caso, en la tercera semana superó este valor. Esto debe ser de alto cuidado, debido a la toxicidad que se puede dar en el sistema, además, la digestión anaerobia se inhibe.

Ya puesto en marcha el sistema, se verificó la estabilidad; el cálculo de moles de biogás que son producidas teóricamente fue de utilidad para comparar la relación de DBOU con el volumen de metano producido en el sistema, por lo cual se hizo seguimiento de la DBOU de la mezcla durante las 4 semanas del mes de junio. Los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 5; además, el volumen de metano en el sistema fue calculado a través de la Ecuación 12.

Ecuación 12. Volumen de metano en los biodigestores.

$$VCH_4 = V_{biodigestor} * \%biogás * \%CH_4$$

$$VCH_4 = 23,562m^3 * 70\% * 79\% = 13m^3$$

Donde:

VCH_4 = Volumen de metano en el biodigestor (m^3).

$V_{biodigestor}$ = Volumen de biodigestores (m^3).

$\%biogás$ = porcentaje de biogás contenido en los biodigestores.

$\%CH_4$ = porcentaje de metano contenido en el biogás.

Tabla 5. *Parámetros fisicoquímicos aguas residuales porcícolas*

Parámetro	Método	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
DBOU (Kg/m^3)	titulación	14,2	17,2	14,3	15
Promedio DBOU					
15,175 kg/m^3					

La literatura técnica demuestra que $1kg/m^3$ estabilizado anaeróticamente va a producir $0,34 m^3$ de CH_4 (Aquino et al., 2007), por lo cual se hizo un promedio de la DBOU medida para cada semana, con el fin de comprobar si la relación cumple, para esto se utilizó la Ecuación 13.

Ecuación 13. Volumen teórico de metano en el sistema

$$V_{tb}CH_4 = \frac{Prom DBOU * V_{tl}CH_4}{lDBOU}$$

Donde:

$V_{tb}CH_4$ = Volumen teórico de metano en el sistema (m^3).

$Prom DBOU$ = Promedio de DBOU en el mes de junio (kg/m^3).

$V_{tl}CH_4$ = Volumen total de metano por la literatura técnica ($0,34m^3$).

$lDBOU$ = concentración de DBOU dada por la literatura técnica (kg/m^3).

$$V_{tbCH_4} = \frac{15,175 * 0,34}{1} = 5,16m^3 \text{ de metano producido teóricamente}$$

Con los cálculos anteriores se afirma que el volumen real de metano producido en los biodigestores teniendo en cuenta la DBOU, es 2,52 veces mayor al metano que se debió estar produciendo teóricamente, la explicación de esto, es que el sistema está expuesto a una alta tasa de desestabilización y grandes concentraciones de nitrógeno que conllevaron a una variabilidad entre los datos reales obtenidos y los datos que teóricamente se deben obtener. Por ende, la eficiencia de los biodigestores será mayor al doble que la dicha por la literatura técnica y tendrá una calidad de biogás excelente, debido al porcentaje de metano que está en un 79%.

5. Conclusiones

Los 3 lodos anaerobios analizados demostraron potencialidad a la hora de producir metano según el ensayo AME; dicho esto el método estadístico de *kruskal wallis* demostró que no importa qué lodo anaerobio se escoja, la cantidad producida de este será similar debido a la cantidad de sustrato que se debe aplicar.

Las condiciones psicrófilas tienen la ventaja con respecto a condiciones mesófilas o termófilas, esto se debe a la alta estabilización del sistema en el proceso de digestión anaerobia. Dicho esto, al cambiar estas condiciones psicrófilas a mesófilas, se observa un aumento en la alcalinidad y pH del sistema, lo cual indica la presencia de inhibidores de la digestión anaerobia y producción de ácido sulfhídrico que alteraron la calidad y cantidad de producción de metano.

La presencia de nitrógeno excesivo en el sistema se debe al aumento de la alcalinidad, que por las diferentes reacciones químicas presentes, transforman este elemento en nitrógeno amoniacal; trayendo como consecuencia la competición de las bacterias metanogénicas con las acetogénicas por el sustrato y por ende, disminuyendo la cantidad de metano producido. Esto causa el aumento de dióxido de carbono en el biogás.

El análisis cromatográfico arrojó resultados de un 79% de metano del total de biogás producido en el sistema, lo cual indica que el sistema adecuó condiciones óptimas para llevar a cabo la digestión anaerobia en sus cuatro fases.

La presión de salida del biogás es 2,013 atm, esto indica que por un tiempo de 1 a 15 minutos diarios, el biodigestor puede producir la combustión del biogás. Después de este intervalo, la presión barométrica disminuye causando disminución de la presión total de salida del biogás y en consecuencia, el desinflamiento de los biodigestores.

Según la hipótesis planteada, se concluye que la selección del M.E para inocular los biodigestores, fue una forma óptima de reducir el tiempo en el cual los biodigestores se estabilizan, ya que según la literatura técnica, se necesitan de periodos entre los 30 a 60 días para que los biodigestores adapten el régimen anaerobio, y como se puede observar, los biodigestores anaerobios tipo Taiwán en el CIPL, lograron una estabilización en un periodo de 3 semanas.

6. Conflicto de intereses

Los autores de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses sobre el trabajo presentado.

Referencias

Aquino, S., Chernicharo, C., Foresti, E., Florencio, M. y Monteggia, L. (2007). Metodologias para determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) EM Lodos Anaeróbios. *Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12(2), 192-201.

- Behling, E., Marín, J., Castro, E., Rincón, N. y Colina, G. (2014). Tratabilidad de un efluente industrial sintético (sacarosa/leche) en un sistema RBC anaeróbico de etapa simple. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 47(1), 1-16.
- Bernal, J. (2012). El biogás. Subgerencia de transferencia de tecnología agropecuaria. División de capacitación y asesoría agropecuaria. Sección de asesoría agropecuaria.
- Blumenstein, B. et al. (2014). *Biogas in Organic Agriculture*. Turkey.
- Chernicharo, C. (2007). *Principios do tratamento biológico de águas residuárias*. Brasil: Universidad Federal de Minas Gerais.
- Díaz, M., Espitia, S. y Molina, F. (2002). *Digestión anaerobia. Una aproximación a la tecnología*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Dirección Ambiental General Sectorial. (2002). *Guía ambiental para el subsector porcícola*. Colombia: Sociedad de Agricultores de Colombia.
- Elías, X., Campos, E. y Flotats, X. (2012). *Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Field, J. (1987). Parámetros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. En: *Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB*. Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen.
- Fuentes, V. (2014). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica para un reactor anaerobio horizontal con material de soporte PET, con efluente de la industria láctea*. (Tesis de Pregrado). Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Hulshoff, L. (1987). Arranque y operación de reactores UASB. En: *Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB*. Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen.
- Parra, R. (2010). *Anaerobic Digestion of Whey: Effect of High Point Loads*. México.
- Penna, J. (1994). *Estudo da metodologia do teste de atividade metanogênica específica*. (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia, USP-São Carlos.
- Pérez, A. y Cajigas, A. (2002). *Corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. (Tesis Pregrado). Ingeniería Sanitaria, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J. y Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, 259-268.
- Torres, P. (2012). Perspectives of anaerobic treatment of domestic wastewater in developing countries. *Revista EIA*, (18), 115-129.