

Digestión Anaerobia de Estiércol Porcino En Un Reactor Tubular Bajo Condiciones
Psicrofílicas A Escala Real

Johanna Alejandra Puentes Lizarazo

Cristian Giovany Gómez Olarte

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Químico

Director

Liliana del Pilar Castro Molano

PhD en Ingeniería Química

Codirector

Humberto Escalante Hernández

PhD en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A DIOS, por bendecirme con su gran amor y darme fuerzas para mantenerme en el proceso y obtener mi título profesional.

A mis padres, GLADYS y HUGO, mi más grande admiración por sus sacrificios y esfuerzos; por inculcar en mí su espíritu guerrero y valentía; por creer en mis capacidades y demostrarme su orgullo por lo que cultivan en mí cada día. A mi madre, ejemplo de valentía y perseverancia, mi fiel amiga y protectora. A mi padre, ejemplo de lucha y constancia.

A mis tres hermanos, por su compañía en este proceso de superación personal y profesional.

A mi tío Natanael y la Fundación Camino de Emaús, por la ayuda que me brindaron a lo largo de mi carrera.

A Jaime M, por enseñarme que si deseamos algo con mente y corazón el universo gira a nuestro favor y que no hay límites para lograrlo.

A mis amigos por su apoyo y compañía en este proceso y por el aporte que pudieron transmitir a mi vida.

A mis familiares, por sus contribuciones de ayuda y sostén.

Alejandra

Dedicatoria

A Dios.

A mis padres, Silvia y Argemiro, por su apoyo y esfuerzo incondicional para permitirme estudiar, tener otra perspectiva de la vida, del mundo y de lo que podía llegar a ser; su esfuerzo, valentía y coraje siempre habré de admirar, los amo.

A mis abuelos, en quienes siempre vi motivación, espíritu guerrero, sabiduría y grandes enseñanzas para la vida. A mi bisabuela Isabel, por sus historias de vida que siempre me hacían sentir tonto cuando yo creía tener problemas, la admiro y aprecio demasiado.

A mis hermanos, Diego y Brayan, tío Orlando, tías, tíos, primos, familiares y personas que han estado ahí en cualquier etapa de la carrera... ¡Sí se pudo!

A quienes la vida me permitió conocer a lo largo de este proceso: Mafe, Diego, Carlos, Sebastián, Lizeth, Laura, Fabián, Jenny, Yahira, Ricardo, entre otros, gracias por sus palabras de aliento y apoyo en los momentos cruciales de formación académica y ejecución del trabajo de grado, espero cruzarnos en el camino de nuevo.

A mis profesoras de primaria, Lilia y Amelia, quienes me motivaron desde pequeño para alcanzar los sueños que hasta hoy he podido hacer realidad.

A quienes no creían, ustedes fueron una gran motivación para escribir este pequeño fragmento de mi vida: difícil y decisivo, pero hoy, satisfactorio y enriquecedor.

A todos ustedes.

Carpe Diem



Cristian Gómez Olarte

Agradecimientos

A Dios por ayudarnos a mantener firmeza y persistencia para alcanzar esta meta.

A la profesora Lilibiana Castro, por su total entrega, motivación y confianza; por el tiempo brindado y por ser una gran guía en el trabajo.

Al profesor Humberto Escalante, por su aporte, orientación y experiencia brindada durante el desarrollo del trabajo.

Al Sr. Luis Alfonso Cocunubo, propietario de La Granja Porcícola La Loma, por permitirnos estudiar y monitorear el digestor; a los trabajadores de la granja por la información suministrada, valiosa e importante colaboración para el desarrollo del trabajo.

A los doctores Sergi Astals y Jaime Martí, expertos internacionales en la línea de digestión anaerobia que aportaron valiosos conocimientos y sugerencias para culminar con éxito este trabajo de grado.

Al profesor Yesid Rueda, de la escuela de ingeniería mecánica por su importante asesoría en la fase final del trabajo de grado.

Al equipo de trabajo de la línea de investigación en Digestión Anaerobia, por su ayuda y apoyo en la solución de cada etapa del trabajo.

A todos los profesores que aportaron sus experiencias y conocimientos, al grupo técnico de apoyo y personal administrativo de la escuela de Ingeniería química, a nuestros padres, familiares, compañeros, y amigos que hicieron parte de este proceso de formación.

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO.....	19
1.1 Proceso de digestión anaerobia.....	19
1.2 Biodigestores Tubulares.....	21
1.3 Operación y adaptación de biodigestores en psicofilia	22
1.3.1 Alternativas de tipo operacional	22
1.3.2 Alternativas de tipo térmico.....	22
1.3.3 Alternativas microbiológicas.	23
1.4 Mecanismos de transferencia de calor	25
2. METODOLOGÍA	26
2.1 Descripción del sitio de estudio	26
2.2 Descripción del comportamiento térmico en un biodigestor con invernadero	28
2.4 Evaluación de la dinámica operacional del proceso de digestión.....	31
2.5 Evaluación de la calidad del digerido	32
2.6 Métodos analíticos	32
2.7 Análisis estadístico.....	33

3. RESULTADOS.....	33
3.1. Comportamiento térmico del biodigestor	33
3.1.1 Efecto del invernadero sobre la temperatura del “slurry”.....	33
3.1.2 Efecto de luminosidad solar y Ambiente sobre la <i>Tslurry</i>	34
3.1.3 Perfiles de Temperatura y análisis de flujo de transferencia de calor.....	34
3.2 Dinámica operacional del proceso de digestión anaerobia	37
3.3 Calidad microbiológica y nutricional del digerido	39
3.4 Consideraciones energéticas y económicas	40
4. CONCLUSIONES	42
5. RECOMENDACIONES.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
APÉNDICES.....	50

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros y dimensiones del biodigestor y el invernadero	28
Tabla 2. Parámetros bioquímicos, fisicoquímicos y de rendimiento del proceso monitoreados en el biodigestor de la GPL durante 12 semanas	41
Tabla 3. Revisión bibliográfica de digestión anaeróbica de estiércol.....	42

Lista de Figuras

Figura 1. Adaptaciones fisiológicas comunes en una procariota psicrófila 25

Figura 2. Biodigestor Granja Porcícola La Loma 27

Figura 3. Corrales para calefacción de los lechones 27

Figura 4. Ilustración sistema de estudio “Slurry” 29

Figura 5. Comportamiento térmico del biodigestor. 36

Lista de Apéndices

Apéndice A. Solución balance de energía para el sistema ‘slurry’	50
Apéndice B. Especificaciones Sensores de Temperatura y luminosidad.	53

Glosario

AGV	Ácidos Grasos Volátiles
AME	Actividad Metanogénica Específica
AT	Alcalinidad Total
BBC	Biodigestores de Bajo Costo
DA	Digestión Anaerobia
DQO	Demanda Química de Oxígeno
GPL	Granja Porcícola la Loma
PBM	Potencial de Biometanización
SV	Sólidos Volátiles
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica

Resumen

TÍTULO: DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL PORCINO BAJO CONDICIONES PSICROFÍLICAS EN UN DIGESTOR TUBULAR A ESCALA REAL*

AUTORES: CRISTIAN GIOVANY GÓMEZ OLARTE**, JOHANNA ALEJANDRA PUENTES LIZARZO**

PALABRAS CLAVE: digestion anaerobia, psicofílico, estiércol de cerdo, invernadero, slurry, digerido, transferencia de calor, biogás

DESCRIPCIÓN

El propósito de esta investigación fue evaluar la digestión anaerobia de estiércol porcino bajo condiciones psicofílicas en un digestor tubular a escala real. Las dimensiones del sistema de biodigestión son 30 m de longitud y 2,5 m de diámetro, el cual se encuentra aislado del ambiente mediante un invernadero de polietileno de baja densidad y es alimentado con estiércol porcino y agua en una relación de dilución 1:6. El biodigestor fue monitoreado durante 12 semanas en términos de materia orgánica (SV, DQO), estabilidad (AGV, pH, capacidad buffer), rendimiento y producción del proceso (VPB, PEB, AME, PBM, etc.), calidad del digerido (coliformes totales, *E. coli*, nutrientes), y el comportamiento durante 47 días de las temperaturas: ambiente, del aire al interior del invernadero, 'slurry' y del suelo, para analizar el efecto del invernadero sobre la temperatura de operación del proceso. Los datos obtenidos indican que la remoción de materia orgánica es buena (75,26% SV, 66.53% DQO) a pesar de operar en un rango psicofílico, lo cual permite inferir que las bacterias y *archaeas* han logrado adaptarse a las condiciones extremas al interior del reactor. Además, el biodigestor trabaja estable y sin riesgo de inhibición con concentraciones de AGV inferiores a 1000 mg ácido acético/L en el efluente y pH en el rango de 6,15 – 7,59. Se encontró una alta actividad metanogénica específica (AME) en el efluente

Por otra parte, la temperatura del aire al interior del invernadero logró alcanzar valores superiores a 30°C durante las franjas horarias donde hay mayor intensidad de luminosidad solar. Sin embargo, no se evidenció variación en la temperatura de operación del proceso (temperatura del *slurry*) que se mantuvo en un valor promedio de 17,7°C. Por tanto, el invernadero tiene una función de protección del biodigestor.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directores: Liliana del Pilar Castro Molano, Ingeniera Química PhD. Humberto Escalante Hernández, Ingeniero Químico PhD.

Abstract

TITLE: PIG MANURE ANAEROBIC DIGESTION UNDER PSYCHROPHILIC CONDITIONS IN A REAL SCALE TUBULAR DIGESTER*

AUTHORS: CRISTIAN GIOVANY GÓMEZ OLARTE** , JOHANNA ALEJANDRA PUENTES LIZARZO**

KEYWORDS: anaerobic digestion, psychrophilic, pig manure, greenhouse, slurry, digestate, heat transfer, biogas

The aim of this research was evaluate the anaerobic digestion of pig manure under psychrophilic conditions in a real scale tubular digester. The dimensions of the biodigestion system were 30 m length and 2,5 m diameter, it's insolated by means of a greenhouse made with low density polyethylene and fed with pig manure and water in a dilution relation 1:6. Biodigester was monitored during 12 weeks in relation to organic matter (VS, COD), stability (VFA, pH, buffer capability), process performance and production (BPR, SBP,SMA, BMP,), digestate quality (total coliforms, E. coli, nutrients), and the behavior during 47 days of the temperatures: ambient, greenhouse air, slurry, and ground, for discussing the effect of the greenhouse over the operational process temperature. The data obtained indicate that organic matter removal is high (75,26% VS, 66,53% COD) besides operating under psychrophilic range, which allows infer that bacteria and archaea community have adapted to the extreme conditions inside the reactor. Moreover, biodigester works stable and without inhibition risk with VFA concentrations lower than 1000 mg acetic acid/L in the effluent and pH range between 6,15 – 7,59. It's found high specific methanogenic activity

On the other hand, the greenhouse air temperature showed values higher than 30°C during the time lapses where solar luminosity is higher. However, there was no variation in the process operation temperature (slurry temperature) that kept its average value in 17,7°C. Hence, greenhouse has a protection function for the biodigester.

* Undergraduate Project

** Physical Chemical Engineering Faculty, Chemical Engineering School. Directors: Liliana del Pilar Castro Molano, Chemical Engineer PhD, Humberto Escalante Hernández, Chemical Engineer, PhD.

Introducción

La producción porcina es de gran importancia dentro de la alimentación humana, debido a que aporta más del 43% de la producción mundial de carne (OCDE/FAO, 2013). Se estima que en Colombia, existen aproximadamente 14.000 granjas porcícolas con capacidad para la cría de más de 1,7 millones de cerdos. La crianza intensiva de porcinos genera grandes volúmenes de estiércol. Por ejemplo, un cerdo de 100 kg de peso excreta aproximadamente 6,17 kg/día de heces y orina. La inadecuada gestión de esta cantidad de estiércol representa impactos ambientales como: contaminación de aguas subterráneas, acidificación producida por NH_3 , contribución al efecto invernadero, entre otros (Porkcolombia, 2015). De acuerdo al contexto descrito, una alternativa atractiva para la gestión y valorización del estiércol de cerdo es el uso de pequeñas y medianas plantas de biogás provistas de biodigestores tubulares de plástico (polietileno de baja y alta densidad). En el biodigestor tubular se lleva a cabo el proceso anaerobio, que consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por un consorcio microbiano (bacterias hidrolíticas, fermentativas, acetogénicas y *archaeas* metanogénicas) para la producción de biogás y digerido (Mao C. , Feng, Wang, & Ren, 2015). El biogás producido en estas pequeñas y medianas plantas es usado para cocinar y como calefacción para animales (Botero, 2011). El digerido, producto principal de la digestión en términos de masa (70% del producto final), corresponde a una mezcla de biomasa microbiana y material no degradado durante la bioconversión (Paavola & Rintala, 2008). Experimentalmente a escala de laboratorio se ha demostrado que el consorcio microbiano realiza la mejor bioquímica a temperatura de 37°C; reportándose los valores más altos de rendimiento del proceso (Lansing, R., & Martin, 2008). En los bioreactores rurales (escala industrial o piloto), el rendimiento del proceso se encuentra

influenciado por el clima del lugar de instalación (radiación solar y temperatura) (Martí-Herrero, y otros, 2014). Con respecto a Colombia, nuestro país presenta una diversidad geográfica que genera un amplio mosaico de climas y microclimas, que van desde los más calurosos ($> 35^{\circ}\text{C}$) en las costas y llanuras hasta los más fríos (temperaturas bajo 0°C en los picos de las montañas de la Cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta) (IDEAM, 2019). Los biodigestores que operan en regiones tropicales y subtropicales se encuentran en condiciones mesófilas ($>20^{\circ}\text{C}$ y $<45^{\circ}\text{C}$; siendo 37°C la temperatura óptima del proceso anaerobio), lo cual permite un tamaño de digester relativamente pequeño y producción de biogás y digerido de alta calidad (Castro, y otros, 2017). Sin embargo, existen biodigestores instalados a más de 2500 metros sobre el nivel del mar que se encuentran en condiciones psicofílicas ($<20^{\circ}\text{C}$).

Siendo así, los biodigestores psicofílicos pueden llevar a presentar limitaciones debido a que:

a) la actividad microbiana se reduce debido a que la temperatura óptima de crecimiento de las bacterias y *archaeas* es de 37°C .

b) la remoción de materia orgánica disminuye y por ende la concentración de metano en el biogás; y una fracción de este biogás se solubiliza en el digerido.

c) por lo anterior, el digerido contiene materia orgánica que se convierte en amoníaco (NH_3) y metano (CH_4) durante su almacenamiento y uso en la tierra (Sambusiti, y otros, 2015). Lo anterior, se traduce en una pérdida de eficiencia energética e impacto ambiental por las emisiones gaseosas mencionadas (Guilayn, y otros, 2019).

d) los biodigestores son abandonados por los usuarios, debido a que no se genera la cantidad de biogás esperado, lo que trae como consecuencia una mala reputación de la tecnología en climas fríos y falsas creencias de que a alturas mayores a 2500 msnm no es posible llevar a cabo procesos anaerobios.

Particularmente, en el municipio de Güicán, en el departamento de Boyacá, está ubicada una mediana granja denominada “Granja Porcícola La Loma”, localizada en la Vereda El Centro, a 2963 m.s.n.m. y una latitud de 6°27'45.0" N 72°24'43.0" W con una temperatura promedio de 12,2 °C (IDEAM, 2019). Esta granja cuenta desde hace 6 años con un digestor tubular fabricado en polietileno de baja densidad, provisto de un invernadero para mitigar el efecto de las bajas temperaturas. Sin embargo, en esta granja se desconoce la eficiencia del proceso anaerobio, la calidad de los productos generados (biogás y digerido) y el efecto de la implementación del invernadero sobre la temperatura del proceso.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se requiere determinar el funcionamiento térmico y operacional del proceso de digestión anaerobia a bajas temperaturas, que permita prevenir y controlar problemas de tipo económico (pérdida de la inversión de la instalación del digestor), operacional (biogás y digerido de mala calidad), ambiental (emisiones de gases a la atmósfera CH₄, CO₂, NH₃ y N₂O) y social (problemas de salud pública) por el mal funcionamiento y/o abandono de los digestores.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos de este trabajo de grado modalidad investigación fueron:

- i) Describir el comportamiento térmico del biodigestor instalado a 2963 m.s.n.m en la “granja porcícola la Loma”
- ii) Evaluar la dinámica operacional del proceso de digestión anaeróbica del estiércol porcino en un digestor a escala real bajo condiciones psicrófilas, y
- iii) Determinar la calidad del digerido producido durante la bioconversión anaerobia.

1. Marco Teórico

1.1 Proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual la materia orgánica compleja se descompone debido a la acción de varios grupos de microorganismos (bacterias, fermentadoras y archaeas) dando como productos finales un biogás y un digerido (residuo estabilizado). El biogás es un producto gaseoso compuesto mayoritariamente por CH_4 y CO_2 , con proporciones que pueden variar entre un 50 y un 70% de CH_4 . Además, puede incluir H_2 , H_2S y otros gases. Por otra parte, el digerido es un subproducto que contiene una mezcla de compuestos minerales que permiten su aplicación como fertilizante orgánico en cultivos agrícola (Fernández, Martínez, Morán, & Gómez, 2017). Dentro de las ventajas del proceso anaerobio, se resalta la capacidad para tratar un amplio rango de sustratos (ej: aguas residuales industriales y municipales, residuos sólidos municipales, estiércoles, residuos agropecuarios y cultivos energéticos). Estos residuos contienen altas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable en forma de carbohidratos, lípidos y proteínas. Este proceso generalmente se lleva a cabo a condiciones mesofílicas (37°C), con una relación C/N entre 20 y 35, tiempo de retención hidráulica en el rango de 15-30 días y pH de 6,5 a 8,2 (Mao C. , Feng, Wang, & Ren, 2015).

En la DA se llevan a cabo 4 etapas bioquímicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Lansing, Martin, Botero, Nogueira, & Dias, 2010). La hidrólisis, consiste en la degradación de tres grupos de compuestos orgánicos poliméricos complejos: carbohidratos, proteínas y lípidos (Pavlostathis & Giraldo-Gomez, 1991). Los monómeros resultantes de la hidrólisis se utilizan por microorganismos fermentativos que principalmente los transforman en

ácidos grasos volátiles (AGV) como el acetato, propionato, butirato y valerato, alcoholes como el metanol y etanol; y gases como el H_2 y CO_2 , etapa conocida como acidogénesis (Ramírez, 2013). En la etapa de la acetogénesis se sintetiza acetato por la reducción de CO_2 y ácidos orgánicos. En este proceso actúan microorganismos homoacetanogénicos consumidores de H_2 y CO_2 que producen acetato (Angelidaki, Karakashev, Batstone, Plugge, & Stams, 2011). Por último, en la metanogénesis, los productos anteriores se transforman en metano y dióxido de carbono (Fernández, Martínez, Morán, & Gómez, 2017).

Con el objeto de evaluar la viabilidad de un residuo para ser tratado mediante sistemas de bioconversión anaeróbica, se cuantifica su potencial de biometanización (PBM). El PBM se define como la capacidad de biodegradabilidad anaeróbica de un sustrato, expresada como rendimiento ($Y_{p/s}$), como el volumen de metano acumulado, medido en condiciones estándar de temperatura y presión (STP), por cantidad de sustrato en términos de materia orgánica. La materia orgánica se puede expresar en términos de SV o DQO, adicionados o removidos.

La Actividad Metanogénica Específica (AME), se refiere a la capacidad de la biomasa microbiana para transformar un sustrato específico (hidrógeno, acetato y propionato) en metano; se expresa como la masa de sustrato, en términos de demanda química de oxígeno que es convertida a metano, por unidad de biomasa y por unidad de tiempo ($g\ DQO\ CH_4/gSVdía$) (Astals, Batstone, Tait, & Jesen, 2015).

El pH es una de las variables que determinan la estabilidad en el proceso. Se ha demostrado que el rango óptimo de pH para obtener máxima producción de biogás en la digestión anaerobia es de 6,5 a 8,2 (Poh & Chong, 2009).

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son el resultado de la fase de acidogénesis y son principalmente el ácido acético, propiónico y butírico (Pandey & al, 2011); y la alcalinidad total (AT) es la capacidad que posee el sistema para amortiguar la presencia de ácidos sin disminuir el pH.

1.2 Biodigestores Tubulares

La DA puede llevarse a cabo en biodigestores tubulares de plástico. El biodigestor es una manga hermética cerrada de forma cilíndrica, fabricada con una bolsa de polietileno o geomembrana de PVC. Estos polímeros presentan alta protección a la acción de los rayos ultravioleta, impermeable al agua y baja permeabilidad a los gases donde se almacenará la materia orgánica para que se produzca la DA. Este dispositivo se instala semienterrado en una zanja de dimensiones específicas para el perímetro del plástico usado y se le adapta un arreglo tipo invernadero con el fin de aprovechar la energía solar. En estos biodigestores de polietileno, la DA alcanza producciones diarias de volumen de biogás entre el 15 y 30%, con relación al volumen de la fase líquida total y entre 65 y 70% de digerido.

La producción de biogás no es una constante, sino que es una variable que viene dada por el tiempo de retención hidráulico (TRH), éste es definido como la duración del proceso de DA, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás (Martí-Herrero J. , 2008).

Desde el punto de vista económico, los biodigestores de polietileno son denominados “Biodigestores de Bajo Costo” (BBC), porque no requieren dispositivos para calefacción y para agitación y su material de fabricación es de bajo costo. En América Latina, los precios de un biodigestor BBC pueden fluctuar entre 200 y 2000 dólares. Cuando se utiliza polietileno de baja densidad el costo va desde 200 a 700 dólares (excluyendo mano de obra e instrumentación). Para

los casos en que se utiliza polietileno de alta densidad o geomembrana los costos se elevan de 500 a 700 dólares (Garfí, Garwood, & Ferrer, 2016).

1.3 Operación y adaptación de biodigestores en psicofilia

La mejora de procesos anaerobios a bajas temperaturas ($<20^{\circ}\text{C}$) puede efectuarse mediante alguna de las siguientes alternativas.

1.3.1 Alternativas de tipo operacional. Diseño del biodigestor con largos tiempos de retención hidráulica. Debido a que la temperatura de operación se encuentra en el rango psicofílico, la actividad microbiana es baja y por ende para alcanzar un buen porcentaje de remoción orgánica es necesario aumentar el tiempo de retención hidráulica (TRH), lo cual conlleva a que el volumen del digestor sea más grande. Es decir, una disminución de 5°C en la temperatura de operación se traduce en un aumento del TRH de 30 a 50 días manteniendo la alimentación y producción de gas similares (Buysman, 2009).

1.3.2 Alternativas de tipo térmico. Calentamiento del digestor aprovechando la luz solar. En cuanto a la parte térmica podría calentarse la alimentación. Sin embargo, este procedimiento no es muy práctico para periodos de retención largos (>60 días). Simplemente debido a que el afluente necesita estar 60°C por encima para contrarrestar 1°C de pérdida de calor diaria. Por otra parte, si el efluente se mezcla en una relación 1:1 con agua, la temperatura del agua necesitaría ser casi 100°C para calentar la alimentación hasta 60°C (considerando que el sustrato esté a 20°C). Tal temperatura afectaría negativamente el consorcio microbiano que fue adaptado a temperaturas psicofílicas. No obstante, si el digestor está muy bien aislado, calentar la alimentación sería un proceso factible (Anand & Singh, 1993).

De otro lado, los biodigestores instalados en zonas con temperaturas bajas y expuestos a condiciones climáticas no favorables suelen adaptarse mediante diseños bioclimáticos (invernadero) que permitan su protección de los cambios extremos en el ambiente y ayuden a mantener la temperatura de operación en el rango óptimo de crecimiento microbiano, principalmente, de las arqueas metanogénicas.

Las arqueas metanogénicas son sensibles a cambios de temperatura, por lo cual mantener unas condiciones óptimas de operación es de vital importancia para que la producción y calidad de biogás no se vea afectada. El objetivo principal del invernadero es absorber la radiación en el recinto y mantenerla para elevar la temperatura al interior que ayude a evitar las pérdidas de calor desde el biodigestor hacia el ambiente externo. Las pérdidas de calor durante la noche pueden ser reducidas añadiendo un aislamiento en la parte superior del invernadero solo durante la noche (Tiwari & Chandra, 1986). La combinación de una cubierta solar, calentamiento de la alimentación y plástico del digestor delgado incrementa la temperatura del digestor hasta 10°C comparado con un digestor que se mantenga temperatura ambiente (Martí-Herrero J. , 2008).

1.3.3 Alternativas microbiológicas. Adaptación del inóculo. Microorganismos adaptados solo al frío (psicrofílicos) pueden actuar constantemente a temperaturas inferiores a 20°C gracias a mecanismos de evolución que les permiten enfrentar las restricciones termodinámicas acompañantes (Feller, 2017).

Dichos microorganismos alcanzan buenas condiciones fisiológicas y ecológicas en ambientes fríos debido a características únicas en las proteínas membranas, lípidos y respuestas genéticas a cambios térmicos. Todos los microorganismos se ven afectados por cambios repentinos en su ambiente, específicamente en variables como salinidad y temperatura. Ellos ajustan dichas variaciones abruptas en su entorno a través de la expresión de varias proteínas reguladoras y

sensoras (Dev, 2018). La expresión de proteínas, lípidos y enzimas para adaptarse al frío (proteasas, lipasas y celulasas) en microorganismos psicrófilos y psicrotolerantes hace que tecnologías como la DA sea posible en regiones frías (DeMayer, 2014). Las proteínas adaptativas al frío en los psicrófilos son estructuralmente diferentes a aquellas encontradas en los mesófilos y termófilos, lo cual las hace más flexibles para facilitar cualquier cambio estructural requerido a nivel funcional por la célula y catalizar reacciones bioquímicas a baja temperatura. Dichas modificaciones en la estructura proteica hacen que los metanógenos psicrófilos se adapten rápidamente a condiciones ambientales frías (D'Amico, 2006)

El clima frío puede causar daños severos a la función celular a través de la desintegración de la estructura celular, solidificando la membrana y afectando su permeabilidad, disrupción de interacciones moleculares y afectando las tasas de difusión del soluto y la cinética enzimática. La fisiología celular se ve afectada a temperaturas de congelamiento por la formación de cristales de hielo en el citoplasma que no permiten un balance osmótico en la célula (Klahn & hagemann, 2011).

En la figura 1, se presenta el mecanismo de los psicrófilos para evitar el daño citoplasmático acumulando solutos compatibles, tales como sacarosa, manitol, glicina, entre otros, que disminuyen el punto de congelación citoplasmático protegiendo la célula (Casanueva, 2010) y llevando a cabo mecanismos de autoregulación de diferentes componentes celulares para enfrentar las variaciones externas del ambiente en el que se encuentran (DeMayer, 2014).

La célula microbiana está compuesta principalmente de una bicapa de lípidos. Los psicrófilos tienen la capacidad de transformar los lípidos a insaturados para mantener la fluidez de la membrana a bajas temperaturas. La bicapa de lípidos en la membrana llega a ser rígida para adaptarse a ambientes fríos. Esta rigidez ayuda a mantener las funciones de la membrana

(permeabilidad y movimiento de proteínas cruciales) pues conserva el estado cristalino líquido (Cavicchioli, 2006). Esta adaptación es fundamental para que los sustratos puedan llegar a la célula y sean excretados posteriormente como fuente de alimento para los demás microorganismos que se encuentran en el proceso de digestión anaerobia.

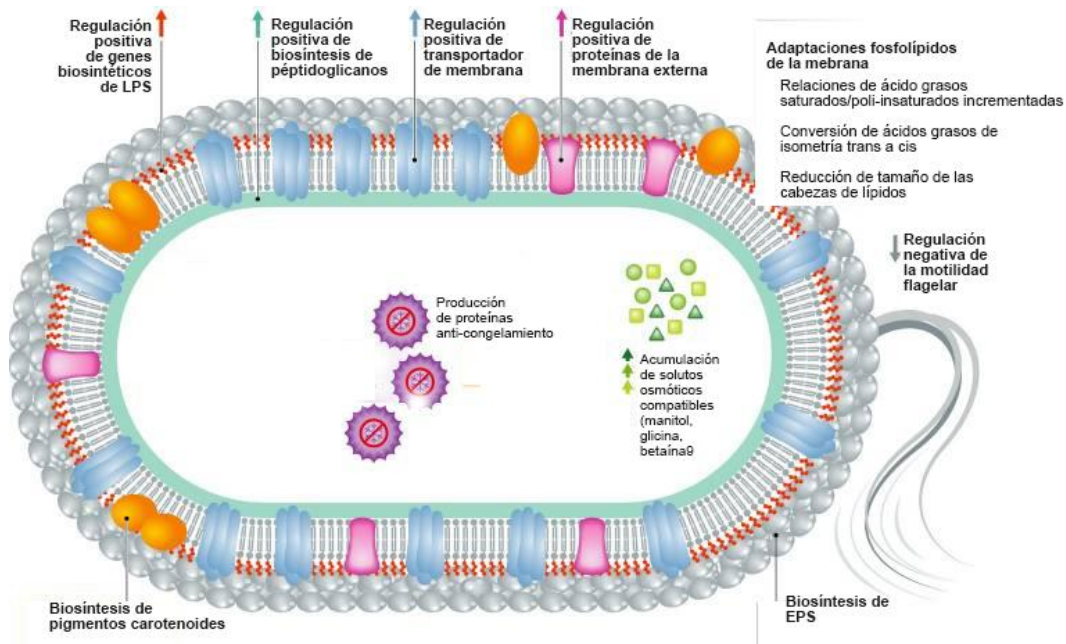


Figura 1. Adaptaciones fisiológicas comunes en una procariota psicrófila
Adaptado de: De Maayer *et al.* (2014)

1.4 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor en un biodigestor equipado con invernadero puede darse mediante diferentes mecanismos: a) La transferencia de calor por **conducción** a través de un elemento, una pared o el suelo, por ejemplo, depende de la sección transversal de éste, del gradiente de temperatura y de la conductividad térmica del material del elemento, b) Las transferencias de calor por convección ocurren por las superficies interiores y exteriores del invernadero (techo y paredes)

con el aire ambiente e interior así como por la parte superior de la manga del digestor con el aire interior y el biogás, y por la superficie del lodo con el biogás. El flujo de calor por **convección** entre una superficie y el medio con el cual está en contacto es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos y al coeficiente de transferencia de calor convectivo (dependiendo del entorno puede ser convección natural o forzada), c) La radiación de ondas largas es un importante modo de transferencia de calor, que tiene lugar entre dos superficies, en este caso dentro del invernadero y hacia el exterior. Dentro del invernadero, el calor es transmitido directamente a cada elemento por radiación, las superficies de cada elemento dentro del invernadero a una temperatura dada emiten radiaciones electromagnéticas (Perrigault, 2009).

2. Metodología

El desarrollo metodológico de este trabajo de investigación se desarrolló en 4 etapas: a) descripción del sitio de estudio, b) descripción del comportamiento térmico del biodigestor, c) evaluación de la dinámica operacional del proceso y d) determinación de la calidad del digerido.

2.1 Descripción del sitio de estudio

El desarrollo de este trabajo de investigación se llevó a cabo en la “Granja Porcícola La Loma” (GPL), la cual está localizada en el municipio de Güicán, en el departamento de Boyacá, Vereda El Centro, a 2963 m.s.n.m. y una latitud de 6°27'45.0" N 72°24'43.0" W con una temperatura promedio de 12,2 °C. Esta granja cuenta con alrededor de 456 cerdos distribuidos en las diferentes categorías (precebos, levante, engorde, finalización, cerdas cría) alimentados con lactosuero y agua. La crianza de los cerdos, genera aproximadamente 1.18 m³/día de excrementos entre estiércol y orina. Para la gestión del 55.96% de los residuos, la granja cuenta desde hace 6 años

con un digestor tubular fabricado en polietileno de baja densidad de 30 m de longitud y 2,5 m de diámetro, adaptado y acondicionado mediante la implementación de un invernadero (Figura 2). Este digestor es alimentado con 4.16 m³/día de mezcla de estiércol y agua de lavado de corral en relación 1:6. El biogás producido en el biodigestor es utilizado para la calefacción de alrededor de 160 lechones (Figura 3). El digerido es vertido a las aguas negras del municipio por lo cual representa un problema por su inadecuada disposición.

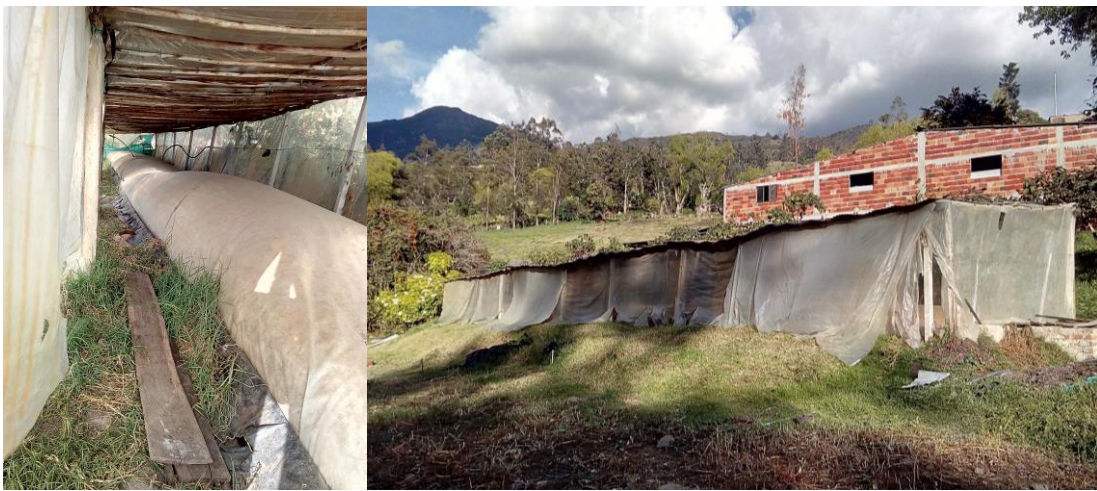


Figura 2. Biodigestor Granja Porcícola La Loma



Figura 3. Corrales para calefacción de los lechones

En la tabla 1 se presentan los parámetros y dimensiones del biodigestor caso de estudio.

Tabla 1.

Parámetros y dimensiones del biodigestor y el invernadero de la GPL

Parámetro	Valor
Características y dimensiones del invernadero (m)	Material paredes: Plástico polietileno para invernaderos Material techo: Teja de polipropileno Largo: 31 Ancho: 3,50 Alto: 2,50
Dimensiones de la zanja (m)	Ancho superior: 2,50 Ancho inferior: 2 Largo: 30 Profundidad: 1,50
Características del material del digestor	Material: polietileno de baja densidad Calibre: 8 Ancho de rollo: 4 m
Dimensiones generales del biodigestor(m)	Largo (LD): 30 Diámetro (D): 2,50
Dimensiones tanque de alimento y tanque almacenamiento efluente (m)	Ancho: 1,20 Largo: 1,20 Profundidad: 1,50
Relación de dilución estiércol porcino: agua	1:6
Caudal de entrada (m ³ /día)	4,16
Carga Orgánica OLR por sus siglas en inglés (kg SV/ m ³ día)	1,16
T.R.H. (días)	76 días
Volumen total (m ³)	147,28

2.2 Descripción del comportamiento térmico en un biodigestor con invernadero

La descripción del comportamiento térmico consistió en realizar el balance de energía en el sistema “*slurry*” debido a que la eficiencia del proceso anaerobio depende de la temperatura del sistema referido. La figura 4 presenta el sistema objeto de estudio y la ubicación de los puntos donde se monitoreó la temperatura.

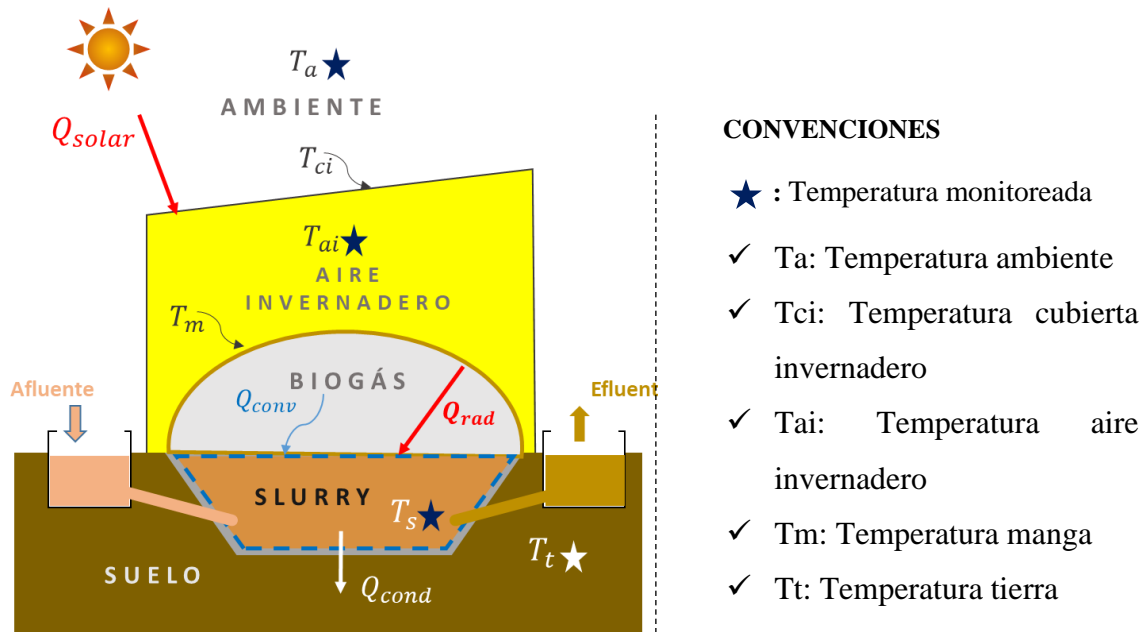


Figura 4. Ilustración sistema de estudio "Slurry"

Para llevar a cabo el balance de energía se asumieron las siguientes consideraciones:

- a) Cada elemento del sistema se representó mediante una sola temperatura (uniforme).
- b) Las capacidades caloríficas de la cubierta del invernadero, del aire en el invernadero, de la manga del digestor y del biogás son despreciables.
- c) El volumen dentro de la manga del digestor se asume constante y se aproxima como un prisma rectangular (Datta, 2002).
- d) La radiación de calor infrarroja no es absorbida por los gases.
- e) Las pérdidas de calor por evaporación dentro del digestor, ingreso de la alimentación, salida del digerido y flujo de gas hacia el exterior son despreciables.
- f) La estratificación a lo largo de la profundidad del *slurry*, de la campana de biogás y del aire al interior del invernadero se desprecian.
- g) Infiltraciones de aire al interior del invernadero no se tienen en cuenta.
- h) La transmisividad de la cubierta del invernadero es independiente de la dirección de la radiación solar incidente.
- i) La radiación solar reflejada dentro del sistema es despreciable

- j) La generación de calor por la reacción microbiana es despreciable.
- k) Las propiedades del suelo son uniformes, independiente de la profundidad.
- l) La temperatura del suelo no es afectada por la temperatura del digestor

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se realizó un balance de energía para el sistema “Slurry” que se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{acum} = m_s C p_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{solar} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

- ✓ Q_{solar} es el flujo de calor por radiación solar que logra absorber el slurry una vez dicha radiación atraviesa los dos plásticos [J/s].
- ✓ Q_{conv} es el calor por convección natural del biogás confinado entre la manga y el slurry [J/s].
- ✓ Q_{rad} es el calor por radiación entre la manga y el slurry [J/s].
- ✓ Q_{cond} calor que se pierde por conducción hacia el suelo [J/s].

Las variables de respuesta de este modelo fueron Q_{rad} y Q_{cond} y los perfiles de temperaturas obtenidos en cada una de las ubicaciones especificadas. Para el cálculo de Q_{rad} y Q_{cond} se desarrolló un *script* en Matlab para encontrar las raíces del balance de energía y determinar dichos flujos de calor. El procedimiento se describe detalladamente en el Apéndice A.

Para llevar a cabo el anterior análisis se instalaron 4 sensores tipo *datalogger* con el objetivo de monitorear: a) la temperatura (ambiente, interior del invernadero, *slurry* y suelo) y b) luminosidad. Las mediciones se hicieron durante un periodo de 47 días. Los sensores fueron configurados para registrar el valor de la temperatura cada hora y el sensor ubicado al interior del invernadero fue programado para registrar luminosidad solar. La descripción de la ubicación y la forma de instalación fue la siguiente:

Ta (sensor 1) monitorea la temperatura ambiente alrededor del invernadero. Este sensor fue ubicado en uno de los corrales cercano al biodigestor que cuenta con buena ventilación y sombra.

Ts (sensor 2) realiza el registro de la variación de los datos de temperatura del *slurry* (Ts). Este dispositivo fue ubicado un metro hacia adentro de la bolsa del biodigestor, utilizando un tubo de PVC (2in) y alambre galvanizado que se ingresó por la tubería del tanque de salida, el alambre fue sujetado a una de las bases del invernadero.

Tai (Sensor 3) es el dispositivo mediante el cual se observa la variación de la temperatura del aire al interior del invernadero (aire invernadero, Tai). Este fue ubicado en el centro de tal manera que quedara equidistante de la bolsa del biodigestor como del techo del invernadero, además en orientación Sur – Norte para registrar los valores de luminosidad solar que llegan a la bolsa del biodigestor. Este sensor fue ubicado en un segmento de tubo de PVC de 3'' de diámetro y 15 cm de longitud de tal manera que estuviese aireado y no se tuviesen inconvenientes para el registro de la luminosidad solar, fue atado mediante un alambre galvanizado al techo del invernadero.

Tt (sensor 4) monitorea la temperatura del suelo. Este dispositivo fue ubicado 1 metro bajo tierra haciendo uso de un tubo PVC para conocer su ubicación.

Para mayor información de los *dataloggers* empleados (fabricante, sensibilidad, características, etc.) consultar el Apéndice B.

2.4 Evaluación de la dinámica operacional del proceso de digestión

La evaluación consistió en el monitoreo bioquímico y microbiológico del digestor alimentado con estiércol porcino. La eficiencia del proceso de digestión anaerobia en un biodigestor tubular fue monitoreada durante tres meses (12 semanas) tomando una muestra semanal del afluente y efluente del biodigestor. Las muestras se almacenaron, refrigeraron y se transportaron al

Laboratorio de Biotecnología de la Escuela de Ingeniería Química UIS para ser analizadas y determinar: el Potencial de Biometanización (PBM), la actividad metanogénica específica (AME), el contenido de materia orgánica en términos de sólidos volátiles (SV), concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), alcalinidad (AT). La estabilidad del proceso se evaluó con la relación AGV/AT. Adicionalmente se determinó el volumen de biogás y el porcentaje de CH₄, CO₂ y H₂S.

2.5 Evaluación de la calidad del digerido

La calidad del digerido se evaluó mediante un análisis microbiológico (coliformes totales, E. Coli), nutricional (Na, K, Ca, Mg) y bioquímico (ensayo de potencial de biometanización residual).

2.6 Métodos analíticos

Los SV fueron determinados por el método gravimétrico (APHA, 2005). Los AGV y la AT fueron cuantificados por titulación siguiendo el método titrimétrico (Anderson & Yang, 1992).

El pH fue medido usando un potenciómetro de marca Metrohm 691. La composición de biogás (CH₄ y CO₂) se determinó por cromatografía de gases utilizando un detector TCD en un cromatógrafo de marca GC-Agilent 7890^a, usando el Argón como gas de arrastre y una columna capilar tipo Carboxen 1010 plot (longitud 30m, diámetro interno 0,32mm, capa interna de fase estacionaria 25µm. La concentración de H₂S se determinó por infrarojo con un medidor portátil Biogas 5000 LandTec. La prueba de PBM, el PBM residual y la AME se realizó bajo el protocolo propuesto por (Astals, Batstone, Tait, & Jesen, 2015). El volumen de CH₄ producido se estableció mediante la siguiente relación matemática que se ajusta a las condiciones de temperatura trabajadas en este estudio (Martí-Herrero J. , 2008):

$$\text{Biogás} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \left(0,051 \frac{m^3 \text{ biogás}}{kg EP} \right) \left(\frac{kg EP_{afluente}}{día} \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde EP hace referencia a estiércol porcino.

Los análisis microbiológicos (coliformes totales y *E. coli*) fueron determinados mediante filtración por membrana siguiendo la norma SM 9222B y los nutrientes fueron cuantificados mediante el método de absorción atómica.

2.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico haciendo uso del software Minitab 18 con el objetivo de comprobar que los datos cumplieran una distribución normal. Por tanto, se determinó el valor de probabilidad (valor p) para cada una de las series. Posterior a esto, se llevó a cabo un análisis mediante una prueba ANOVA para establecer si existían o no diferencias significativas entre los datos de cada serie (SV, AGV, pH, etc.)

3. Resultados

3.1. Comportamiento térmico del biodigestor

3.1.1 Efecto del invernadero sobre la temperatura del “slurry”. En la Figura 5 a) se presenta el comportamiento de las temperaturas ambiente, invernadero y del *slurry* para un período de 5 días que se tomó como referencia de la tendencia observada durante el tiempo de monitoreo (47 días). La variación en las temperaturas ambiente (T_a) y del aire del invernadero (T_{ai}) sigue un patrón tipo ‘campana’. La T_a registró un valor máximo de 27,95°C y un valor mínimo de 9,56°C y las T_{ai} máxima y mínima fueron 35,65°C y 6,8°C respectivamente. Las T_{ai} son mayores a la T_a durante las 9 de la mañana a las 6 de la tarde y menores en horas de 7 de la noche a las 8 de la

mañana. La temperatura del “slurry” T_s alcanza un valor promedio de $17,79^{\circ}\text{C}$ y no presenta variaciones significativas con respecto a tiempo. Adicionalmente, el valor de T_s se encuentra entre la temperatura máxima promedio y mínima promedio de T_a y está en un valor 6,914% superior a la T_a . (Figura 5b). El comportamiento descrito anteriormente, permite evidenciar que el invernadero funciona de forma adecuada. Sin embargo, la T_s incrementa solo en $1,23^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura del ambiente. Durante el día, el promedio de la T_s es $17,769^{\circ}\text{C}$ y en la noche se obtienen valores de $17,783^{\circ}\text{C}$, lo que demuestra que la T_s es estable con respecto al tiempo. Lo anterior, permite concluir que el invernadero implementado en la granja referencia de este estudio (GPL) tiene una función de protección sobre el digestor y representa un aumento del 28, 65°C en la temperatura del proceso.

3.1.2 Efecto de luminosidad solar y Ambiente sobre la T_{slurry} . El municipio de Guicán, donde se encuentra la GPL, presenta condiciones climáticas de días soleados, seminubosos y nubosos. A manera de ejemplo se presentan las figuras 5c y 5d para un ciclo de 5 días, donde se puede observar que independientemente del tiempo atmosférico, la temperatura del slurry permanece constante en un valor promedio de $17,79^{\circ}\text{C}$. Teniendo en cuenta que el invernadero funciona bajo la presencia de sol, se confirma que el biodigestor no depende del efecto de luminosidad solar y como se mencionó anteriormente el invernadero sirve como protección.

3.1.3 Perfiles de Temperatura y análisis de flujo de transferencia de calor

En las figuras 5 e y f se muestran los perfiles de temperatura (muestra de referencia 24 h) y el flujo de calor durante todo el tiempo de medición. En los perfiles de temperatura, se evidencia que durante el lapso del día donde se presenta mayor intensidad de luminosidad solar (9:00 a.m. a

05:00 p.m. aprox.), la T_{ai} es mayor 33,57% a la T_a , lo que indica que el invernadero está funcionando bajo los parámetros para los cuales fue diseñado. El valor máximo para T_{ai} y T_a es de 33°C y 27°C respectivamente. Sin embargo, aunque el aire al interior del invernadero logra alcanzar temperaturas por encima de 30°C, el efecto que produce sobre la T_s no es significativo. La temperatura de la manga del biodigestor presenta intervalos de temperatura entre 30,02°C y 42°C aproximadamente, lo que indica la transferencia de calor en el invernadero. La T_t tiene valores promedios de 16,38°C, que son similares a los registrados para la T_s . Los resultados obtenidos para los perfiles de temperatura se relacionan con los flujos de calor para los tres mecanismos presentados. Los mecanismos más representativos de transferencia de calor son el calor por radiación y por conducción con flujos promedio de 6539,49 J/s y 6588,23 J/s respectivamente, los cuales no presentan diferencias significativas (p valor 0). El flujo de calor por convección alcanzó valores promedio de 48, 67 J/s. Los resultados demostraron que el invernadero no funciona como diseño bioclimático, por lo cual la temperatura del *slurry* es similar a la temperatura del suelo. Por lo anterior, se requiere implementar un aislante en la zanja para aumentar la temperatura del *slurry*.

Por otro lado, vale la pena resaltar que el diseño bioclimático permite que durante la noche las pérdidas por convección del biodigestor con el aire del ambiente sean menores pues no se encuentra en contacto directo. Además, el biodigestor está rodeado por una capa de aire al interior del invernadero que disminuye su temperatura debido al intercambio de energía con el ambiente en la noche. Lo anterior, permite que la energía cedida por la manga del biodigestor hacia el aire del invernadero sea baja y por tanto el *slurry* no disminuya drásticamente su temperatura en horas de la noche.

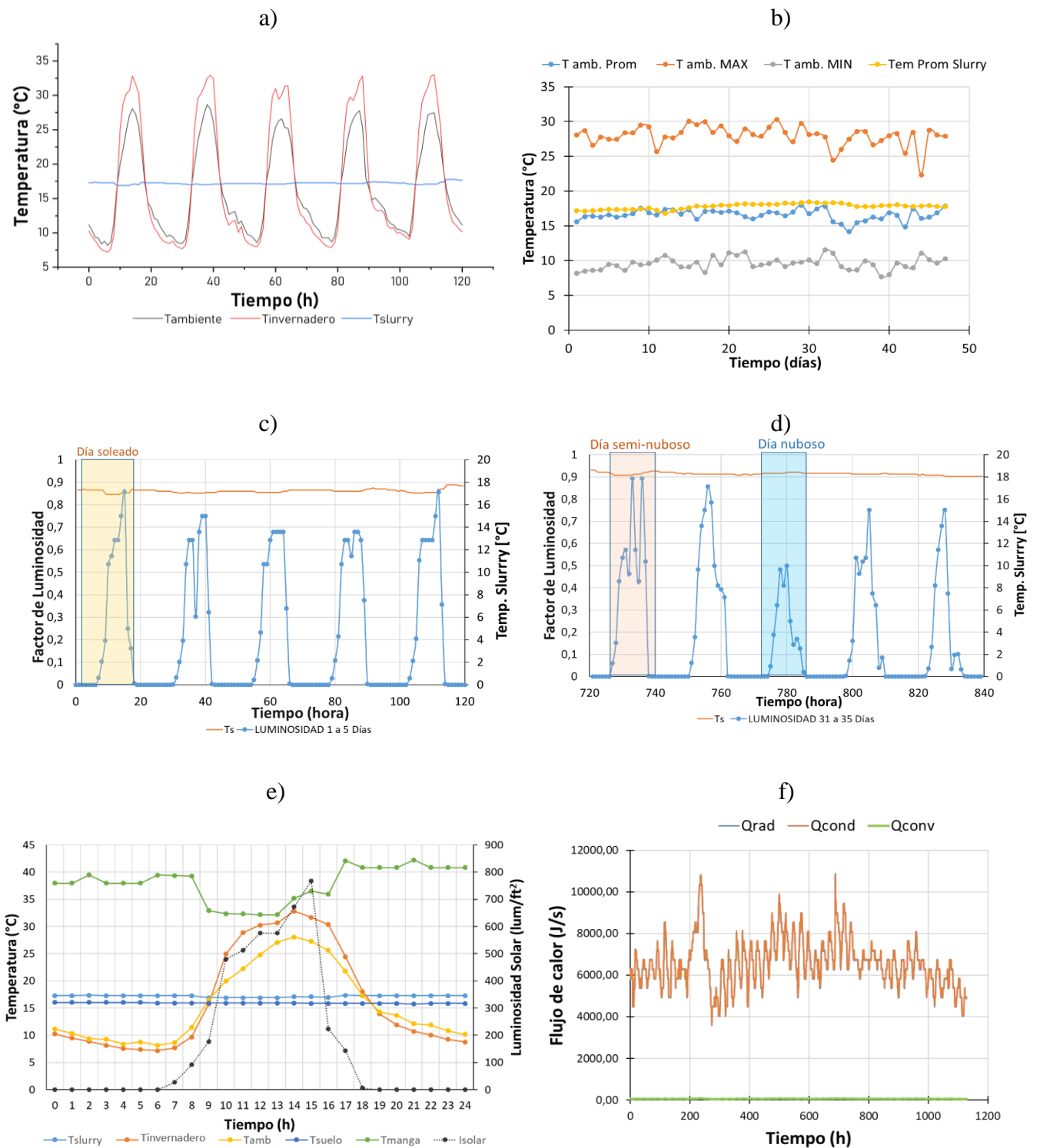


Figura 5. Comportamiento térmico del biodigestor.

a) Perfiles de T_a , T_{ai} y T_s durante 5 días, b) Comportamiento durante 47 días de T_a . Max, T_a . Min, T_a . Prom y T_s Prom, c) y d) Variación de T_s en función del factor de luminosidad, e) Perfiles de T_s , T_{ai} , T_a , T_t , T_m con perfil de luminosidad solar durante un día, f) Comportamiento flujos de calor Q_{rad} , Q_{cond} , Q_{conv} durante 1128 horas

3.2 Dinámica operacional del proceso de digestión anaerobia

En la tabla 2 se presentan los resultados promedio del monitoreo del proceso anaerobio durante 12 semanas. Con respecto a la temperatura de operación, el efluente alcanza un incremento del 7% en relación con la carga de entrada (afluente), por efectos de la implementación del invernadero. El biodigestor presentó una remoción de carga orgánica en términos de sólidos volátiles de 75,26%, la cual es una bioconversión similar a la de procesos anaerobios operados bajo condiciones mesofílicas (Castro, Carballo, Martí, & Escalante, 2017). En términos de estabilidad, un biodigestor en su efluente debe presentar valores de pH entre 6.5 y 8.0; concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) menores a 1500 mgAc. Acético/L y la relación AGV/AT entre 0.3 y 0.4. En este estudio, los valores de pH se encuentra en el rango de $6,153 \pm 0,76$ y $7,591 \pm 0,33$ valores promedio del afluente y el efluente respectivamente, encontrándose dentro del intervalo óptimo para la digestión anaerobia (Søndergaard, Fotidis, Kovalovszki, & Angelidaki, 2015). La concentración promedio de los AGV en el afluente (2713,75 mg Ac. Acet./L) representan la materia orgánica soluble fácilmente biodegradable, disponible para metanizarse, alcanzando una conversión de 88,2%. Durante el tiempo de monitoreo, los valores de AGV estuvieron entre 180 y 720 mg ac. Acet./L, los cuales demuestran que el biodigestor de la GPL es estable sin riesgo de inhibición. Estos resultados indican que la tasa de carga orgánica (OLR) con la que se opera el digestor está en condiciones de funcionamiento apropiadas para la bioconversión anaerobia. La relación AGV/AT oscila entre $0,723 \pm 0,197$ - $0,171 \pm 0,092$ mg de ácido acético / mg de CaCO_3 para el afluente y efluente, respectivamente. Esto demuestra la alta capacidad de amortiguación del estiércol porcino. Los valores de AGV/AT por debajo de 0,8 mg de ácido acético / mg de CaCO_3 son adecuados para la estabilidad del proceso (Castro, y otros, 2017).

En la tabla 2 se presentan los valores de velocidad de producción de biogás y de producción específica de biogás que indican la eficiencia del digestor y del proceso anaerobio respectivamente. La composición del biogás generado por el biodigestor de la GLP presenta valores favorables para el contenido de CH₄ y de CO₂. Sin embargo, la concentración de H₂S en el biogás (ver Tabla 2) representa problemas operacionales porque ocasiona corrosión fácilmente en metales ferrosos que puedan ser utilizados para el aprovechamiento del biogás. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, una exposición a 250 ppm de H₂S puede causar problemas pulmonares (OMS, 2003). En este estudio, la composición reportada de H₂S es el doble de la referenciada para tener problemas de salud. Lo cual indica un estado de alerta para este biodigestor. Adicionalmente, la presencia de H₂S causa afectaciones ambientales por la presencia de la lluvia ácida al someter al biogás a combustión para el calentamiento de los lechones. De acuerdo a lo anterior, es necesario implementar un filtro para limpiar el biogás.

Con respecto al Potencial de Biometanización (PBM) del afluente, es un valor esperado para este tipo de sustratos. Es un valor bajo, por lo cual se podría sugerir un proceso de co digestión en sinergia con otro residuo para mejorar las producciones y calidades de biogás. El PBM residual (valor del efluente) indica que contiene aproximadamente 50% de biogás disuelto que puede ocasionar emisiones al ambiente, perdiéndose la eficiencia energética del digestor. Por otra parte, la Actividad Metanogénica Específica (AME) representa la actividad microbiana, la cual presenta valores altos en el efluente, incluso mayores a los reportados para digerido de estiércol porcino bajo condiciones mesofílicas (0,1918 gDQO / gSV d). Esto puede deberse a que bacterias y *archaeas* después de 6 años se adaptaron a las bajas temperaturas.

Teniendo en cuenta los resultados descritos anteriormente y la información presentada en la tabla 3 (revisión bibliográfica digestión anaeróbica de estiércol porcino en reactores tubulares), se

concluye que el biodigestor instalado en la GPL presenta rendimientos y funcionamientos mayores a los alcanzados por biodigestores instalados a condiciones similares. Además, la eficiencia del proceso anaerobio y del biodigestor es comparable con un biodigestor operado a condiciones mesofílicas. Por tanto, el lugar y el clima donde se encuentra el biodigestor es independiente del proceso anaerobio. Esto puede explicarse debido que el biodigestor de la GPL tiene un volumen muy grande ($147,2 \text{ m}^3$) y alto tiempo de retención (76 días), lo cual es una estrategia desde el diseño de un biodigestor para mitigar las limitaciones de operar bajo régimen psicrófilo.

En ese mismo sentido, otra estrategia para superar la psicrofilia es la adaptación microbiana; en este estudio se puede inferir que el hecho de que el biodigestor este funcionando continuamente durante 6 años ha permitido a las *archaeas* ser extremófilas con alta actividad microbiana ($0,1918 \text{ gDQO/kg SV día}$), debido a una adaptación de su metabolismo a bajas temperaturas (Dev, 2018).

3.3 Calidad microbiológica y nutricional del digerido

El lodo digerido producido en el biodigestor de la GPL fue caracterizado para evaluar su calidad microbiológica y nutricional. En el afluente y en el efluente se cuantificó una concentración de $3,99 \times 10^6 \text{ UFC/ml}$ y de $3,57 \times 10^6 \text{ UFC/mL}$ respectivamente de coliformes totales. Esto indica que este digerido es de Clase B y necesita ser estabilizado antes de ser vertido a suelos de cultivo (EPA., 2003). La reducción de patógenos fue de $0,42 \times 10^6 \text{ UFC/mL}$; esta remoción, es baja comparada con las alcanzadas para procesos anaerobios (Ju, y otros, 2016). Esto se debe a que las bajas temperaturas hacen que los microorganismos patógenos no se vean afectados. Con respecto a los nutrientes, el efluente presenta concentraciones de Na: 97.62 mg/L , K: 235.93 mg/L , Ca: 276.39 mg/L , Mg: $44,94 \text{ mg/L}$. La composición de los nutrientes es elevada para que este digerido

sea aplicada directamente sobre la tierra, debido a que se pueden presentar problemas de conductividad, aireación y endurecimiento del suelo. Por lo anterior, es recomendable realizar un post tratamiento al digerido antes de su utilización.

3.4 Consideraciones energéticas y económicas

La GPL tiene la modalidad de crianza y engorde de cerdos. En esta granja se presentan aproximadamente 5 partos por semana. Durante la crianza de lechones, es necesario crear un microclima utilizando lámparas de calefacción (incubadora) durante dos semanas después del parto que permitan alcanzar temperaturas entre 30°C y 34°C. Para suplir esta necesidad, la GPL acondicionó como lámpara 5 discos de tractor con un diámetro de 50 cm los cuales están equipados con un tubo galvanizado que conduce el biogás para generar la llama e irradiar calor a los lechones y mantener las condiciones óptimas durante la crianza. El biogás generado por el biodigestor tubular de plástico es de 33,22 m³ biogás/día y es únicamente utilizado para la calefacción de los lechones. Una lámpara de tractor consume 64,3 L biogás/h e irradia 33,4 °C hacia los lechones (Guerrero, Pérez, & Botero, 2002).

Las 5 lámparas se mantienen encendidas por un período de 16 horas durante la noche y parte de la mañana generando un consumo energético de 5,144 m³ biogás/día. De acuerdo con estos resultados, se está perdiendo 27,076 m³ biogás/día que podrían ser aprovechados para otra actividad. Además, se genera un impacto ambiental de las emisiones de biogás hacia la atmósfera.

En relación a la parte económica, la granja anteriormente utilizaba lámparas eléctricas de infrarrojo con requerimiento energético de 0,175 kW/h para la calefacción de los lechones. El precio de 1 kWh en el municipio de Güican de la Sierra es de \$539,5916 generando un gasto

mensual de \$400.000 para el calentamiento de los lechones. Actualmente, el biodigestor supe la demanda energética de la granja, por lo cual no se generan gastos asociados a la incubación de lechones.

Tabla 2

Parámetros bioquímicos, fisicoquímicos y de rendimiento del proceso monitoreados en el biodigestor de la GPL durante 12 semanas.

Variable	Unidad	Afluente (Promedio)	Slurry (Promedio)
T	°C	16,56	17,78
Materia Orgánica			
SV	g SV /kg muestra	12,737	2,856
DQO	gDQO/kgSV d	397,75	132,38
Estabilidad			
AGV	mg Ac. acet/L	2713,75	320
AGV/AT	mg Ac. Acet/mg CaCO ₃	0,723	0,171
pH	-	6,153 ± 0,76	7,591 ± 0,33
Eficiencia del Proceso			
Velocidad de Producción de Biogás (VPB)	m ³ biogás / m ³ digestor. día		0,225
Producción Específica de Biogás (PEB)	m ³ biogás / kg SV día		0,61
PBM	Nm ³ CH ₄ / kg SV	0,239	0,122
AME	gDQO / gSV d	0,0084	0,1918
CH ₄	%	63,14 ± 5,35	
CO ₂	%	10,71 ± 1,22	
H ₂ S	ppm	520,75 ± 89,63	

Tabla 3.

Revisión bibliográfica de digestión anaeróbica de estiércol porcino en biodigestor tubular

Localización	Güicán de la Sierra, Colombia	Cajamarca, Perú	Los Andes, Perú	Yucatán, México	Santander, Colombia	Valles andinos, Bolivia
Altura (m.s.n.m)	2983	2800	2800	30	1300	2607
Volumen del Digestor (m³)	147,2	-	10	14,72	6,75	6,47
Tiempo Instalación	6 años	-	-	46 días	15años	5 años
%Remoción SV	75,2	38,18	34,6	47,02	-	41,8
Producción de biogás [m³/día]	33,22	-	-	-	0,45	2,29
PEB [m³/ kgSV d]	0,225	0,03	0,061	-	-	0,21
VPB [m³ biogas/m³ digestor d]	0,617	0,03	0,04	-	-	0,25
%CH₄	63,14	-	65,29	-	-	43,9
Ts (°C)	17,7	-	23	23	34	23
Referencia	Este estudio	Garfí, Sept. 2011	Garfí, Marzo 2011	Fregoso, 2001	Bayona, 2015	Martí, 2015

4. Conclusiones

En la granja porcícola La Loma ubicada en el municipio de Güicán, en el departamento de Boyacá, se encuentra instalado un biodigestor tubular de plástico operado bajo condiciones psicrófilas desde hace 6 años. Después de evaluar el comportamiento térmico y del proceso anaerobio del biodigestor, se concluye que:

1. El invernadero implementado para mitigar el efecto de las bajas temperaturas sobre el proceso anaerobio, tiene una función de protección del biodigestor y permite que el slurry alcance una temperatura de 17,7°C que no varía con las condiciones atmosféricas del lugar. El balance de energía sobre el sistema slurry, determinó que la transferencia de calor por radiación entre la manga del biodigestor y el slurry así como el flujo de calor por conducción desde el slurry hacia

el suelo son iguales en magnitud, y en consecuencia la temperatura del suelo (16,4°C) es similar a la temperatura del slurry (17,7°C).

2. La velocidad de producción de biogás (0,225 m³ biogas/m³ dig. día) y la producción específica de biogás (0,61 m³ biogas/kg SV día) demuestran que el biodigestor es estable y funciona adecuadamente. Sin embargo, se está perdiendo el 84% de biogás, porque su uso es exclusivo para el calentamiento de lechones. La composición del biogás generado es adecuada en términos de CH₄ y CO₂. Sin embargo, la presencia de H₂S es alta, por lo cual se requiere la implementación de una unidad de limpieza de biogás.

3. La calidad del digerido en términos microbiológicos es clase B y presenta alto contenido de nutrientes, por lo cual es necesario realizar un post tratamiento que permita gestionar y valorizar adecuadamente el digerido producido.

5. Recomendaciones

En complemento a este trabajo se recomienda aislar la zanja donde el digestor está instalado con el propósito de aprovechar el flujo de calor que llega por radiación al slurry y así mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia.

En cuanto al digerido que sale del digestor es importante someterlo a un post-tratamiento para la eliminación de los patógenos y algunos gases solubles presentes para así aprovechar y valorar los nutrientes que este fertilizante tiene para el suelo y la agricultura.

Establecer un método de purificación para el biogás por medio de filtros que puedan absorber los gases tóxicos que éste contiene y así impedir intoxicaciones de lechones y cerdas gestantes, al igual que ser utilizado sin problema para combustión de cocina.

Es importante también instalar un reservorio, éste para almacenar el gas que sale del biodigestor y hacer subdivisiones con el fin de utilizar y aprovechar gran parte del biogás en diferentes usos.

Referencias Bibliográficas

- Anand, R., & Singh, R. (1993). A simple technique, charcoal coating around the digester, improves biogas production in winter. *Bioresource Technology*, 45(2), 151-152.
- Anderson, G., & Yang, G. (1992). Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration. *Water Environment Research*, 64, 53-59.
- Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D., Plugge, C., & Stams, A. (2011). Biomethanation and Its Potential. *Methods in Enzymology*, 404, 327-351.
- APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21st ed.). (A. P. Association, Ed.) Washington, D.C.
- Astals, S., Batstone, D., Tait, S., & Jesen, P. (2015). Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Research*, 81, 208-2015.
- Botero, R. (2011). El biodigestor de bajo costo, su aporte a la mitigación del cambio climático y su potencial para reducir la pobreza rural en américa latina y el caribe. *UTN Informa*.
- Buyzman, E. (2009). *Anaerobic Digestion for Developing Countries with Cold Climates - Utilizing solar heat to address technical challenges and facilitating dissemination through the use of carbon finance*. Master Thesis, Wageningen University, Faculty of Environmental Sciences, sub department Environmental Technology, Wageningen.
- Casanueva, A. (2010). Molecular adaptations to psychrophily: the impact of 'omic' technologies. *Trends Microbiology*, 18.

- Castro, L., Carballo, M., Martí, J., & Escalante, H. (2017). Monitoreo a escala real de un digestor anaeróbico de bajo costo instalado en una planta de sacrificio animal. *RedBiolac*.
- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311-317.
- Cavicchioli, R. (2006). Cold-adapted archaea. *Nature reviews microbiology*, 4, 331-343.
- D'Amico, S. (2006). Psychrophilic microorganisms: challenges for life. *EMBO Reports*, 7, 385-389.
- Datta, A. (2002). *Biological and Environmental Heat and Mass Transfer*. New York: Marcel Dekker Inc.
- DeMayer, P. (2014). Some like it cold: understanding the survival strategies of psychrophiles. *EMBO Reports*, 15(5).
- Dev, S. (2018). Perspective on anaerobic digestion for biomethanation in cold environments. *Renewable and sustainable energy reviews*, 103, 85-95.
- EPA. (2003). Environmental Regulations and technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. *Environmental Protection Agency*.
- Feller, G. (2017). Cryosphere and psychrophiles: insights into a cold origin of life? *Life*, 7-25.
- Fernández, C., Martínez, E., Morán, A., & Gómez, X. (2017). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrogeno. *Ion*, 29, 47-62. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/305416427>
- Garfí, M. M.-H., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America. *Renew. Sustain. Energy*, 599-614.

- Guerrero, C., Pérez, A., & Botero, R. (2002). Evaluación del uso de calentadores para lechones, operados con biogás. *Biodigestores plásticos de flujo continuo: investigación y transferencia en países tropicales*, 35-45.
- Guilayn, F., Jimenez, J., Martel, J., Rouez, M., Crest, M., & Patureau, D. (2019). First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. *Waste Management*, 86, 67-79.
- IDEAM. (2019). Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/>
- Ju, F., Li, B., Ma, L., Wang, Y., Huang, D., & Zhang, T. (2016). Antibiotic resistance genes and human bacterial pathogens: co-occurrence, removal, and enrichment in municipal sewage sludge digesters. *Water Res.*, 1-10.
- Klahn, S., & hagemann, M. (2011). Compatible solute biosynthesis in cyanobacteria. *Environmental microbiology*, 13.
- Lansing, S., Martin, J., Botero, R., Nogueira, T., & Dias, E. (2010). Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology*, 101, 4362-4370.
- Lansing, S., R., B., & Martin, J. (2008). Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource technology*, 13, 58881-5890.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, 540-555.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, 540-555.
- Martí-Herrero, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. *Proyecto EnDev Bolivia*, 15-28.

- Martí-Herrero, J., Álvarez, R., Rojas, M., Aliaga, L., Céspedes, R., & Carbonell, J. (2014). Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresource Technology*, 87-93.
- OCDE/FAO. (2013). Perspectivas agrícolas 2013-2022. Obtenido de http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es
- OMS. (2003). *Hydrogen sulfide: human health aspects*. Obtenido de www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf
- Paavola, T., & Rintala, J. (2008). Effects of storage on characteristics and hygienic quality of digestates from four co-digestion concepts of manure and biowaste. *Bioresource Technology*, 99, 7041-7050.
- Pandey, P., & al, e. (2011). Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred conditions. *Biomass and Bioenergy*, 35, 2705-2720.
- Pavlostathis, S., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment. *Science and Technology*, 24, 35-59.
- Perrigault, T. (2009). *Mejoramiento del comportamiento térmico de un biodigestor low-cost tipo plug-flow*. M. Sc. Thesis, Universidad Poitécnica de Catalunya, Barcelona.
- Poh, P., & Chong, M. (2009). Development of anaerobic digestion methods for palm oil. *Bioresource Technology*, 100, 1-9.
- Porkcolombia. (2015). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector porcícola en Colombia*.
- Ramírez, I. (2013). Anaerobic Digestion Modeling: from One to Several Bacterial Populations. *Tecnologías Lógicas*, 31, 181-201.

- Sambusiti, C., Monlau, F., Ficara, E., Musatti, A., Rollini, M., Barakat, A., & Malpei, F. (2015). Comparison of various post-treatments for recovering methane from agricultural digestate. *Fuel processing technology*, 137, 359-365.
- Søndergaard, M., Fotidis, I., Kovalovszki, A., & Angelidaki, I. (2015). Anaerobic Co-digestion of Agricultural Byproducts with Manure for Enhanced Biogas Production. *Energy Fuels* , 8088-8094.
- Tiwari, G., & Chandra, A. (1986). A solar assisted biogas system: a new approach. *Energy conversion and management*, 26(2), 147-150.

Apéndices

Apéndice A. Solución balance de energía para el sistema 'slurry'

El balance de energía para el sistema slurry se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{acum} = m_s C p_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{solar} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond}$$

Dado que en la parte superior del techo se encuentran tejas de polipropileno, el calor solar que relaciona la radiación que recibe el biodigestor debido a las ondas de longitud larga (presentes en el espectro de radiación solar) es despreciable. Por tanto, los fenómenos que van a estar involucrados en el proceso son la radiación electromagnética (ondas de longitud corta), la convección natural del biogás al interior y la conducción hacia el suelo.

Una vez realizado el tratamiento de datos, se logra observar que el cambio de T_s con respecto al tiempo es aproximadamente cero. Por tanto, el balance queda expresado de la siguiente manera:

$$0 = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{cond}$$

Ahora bien, cada calor se puede expresar como sigue:

$$\checkmark Q_{conv} = h_{conv} A_s (T_m - T_s)$$

$$\checkmark Q_{rad} = \sigma A_m \frac{(T_s^2 + T_m^2)(T_s + T_m)}{\frac{(1 - \epsilon_s) A_m}{\epsilon_s A_s} + \frac{1}{f_{m-s}} + \frac{1 - \epsilon_m}{\epsilon_m}} (T_m - T_s)$$

$$\checkmark Q_{cond} = \frac{1}{\sum \frac{e_{ins}}{k_{ins} A_{ins}}} (T_t - T_s)$$

Como se logra observar, el balance de energía queda en términos de la temperatura de la manga (T_m), debido a que fue la única temperatura que no se monitoreó con los sensores. Por tanto, esto hace que el balance de energía quede expresado como un polinomio de grado 4 igualado a cero, así:

$$h_{conv}A_s(T_m - T_s) + \sigma A_m \frac{(T_s^4 - T_m^4)}{\frac{(1 - \epsilon_s)A_m}{\epsilon_s A_s} + \frac{1}{f_{m-s}} + \frac{1 - \epsilon_m}{\epsilon_m}} + \frac{1}{\sum \frac{e_{ins}}{k_{ins}A_{ins}}} (T_t - T_s) = 0$$

Para resolver dicho balance se hace uso de la función *roots* en MatLab, dicha función toma los coeficientes del polinomio y calcula los eigenvalores de la matriz, es decir, las raíces.

Como información de entrada al programa se suministra un archivo de Excel con la información de las T_s y Q_{rad} calculado para cada T_t durante las 1128 horas (47 días) del periodo monitoreado, así como se agrupan los demás parámetros en constantes y se suministra dicho valor. De las 4 raíces que arroja la solución del *script* se toma el valor de la raíz real.

A continuación, se adjunta el script empleado en MatLab para la determinación de las raíces del polinomio.

```

clc

B=2.546*10^-6;
A=5.26614;

m = csvread('SimulacionFinal.csv',1,0,[1,0,1128,3]);

for i=1: size(m,1)
    ts=m(i,2)+273.15;
    j=m(i,3)*1000;
    C=j-A*ts-B*ts^4;
    p=[B 0 0 A C];
    r=roots(p); %raíces del polinomio
    v(i)= r(4);
end
csvwrite('dataOut.csv',v)
p1=poly(r); %reconstruimos el polinomio a partir de las raíces

```

Para este código, B corresponde al valor que acompaña a Tm^4 una vez simplificada toda la ecuación, y A corresponde al valor que acompaña a Tm . Además de esto dichas constantes (A y B) afectan también los términos de Ts que ya se tienen proporcionados. Por tanto, se simplifica una constante global que equivale a C, que relaciona j (calor por conducción y Ts). Los valores de A y B recopilan las constantes de los denominadores.

Una vez calculada la Tm_{anga} , se determina el valor de los Q_{rad} , Q_{conv} involucrados en el proceso.

Apéndice B. Especificaciones Sensores de Temperatura y luminosidad.

Los sensores empleados para monitorear las temperaturas y la luminosidad solar fueron tipo *dataloggers* fabricados por HOBO Pendant®. A continuación, se describen los dos tipos de sensores empleados.

1. Sensor de temperatura



Para monitoreo de temperatura en diversas aplicaciones ya que es colgante, sumergible, y de tamaño pequeño. Además, cuenta con indicador LED.

Nombre del modelo empleado: HOBO 8K Pendant® Temperature/Alarm (Waterproof) Data Logger

Características

- Carcasa impermeable para uso húmedo o subacuático
- Lectura de datos en menos de 30 segundos a través de una interfaz USB óptica
- Compatible con el software HOBOWare y HOBOWare Pro para la configuración, realizar gráficos y análisis del registrador

Especificaciones técnicas

- Rango de operación: -20° a 70°C

- Precisión: ± 0.53 ° C desde 0 ° a 50 ° C
- Resolución: 0.14 ° C a 25 ° C
- Modos de memoria: Cuando está llena o sobrescribir datos
- Tiempo de respuesta: 5 minutos en agua; 10 minutos en el aire a 2m/s
- Tipo de batería: CR-2032 3-Voltios
- Duración de batería: Típicamente 1 año
- Memoria: 8KB 6500 mediciones aproximadamente
- Materiales: Carcasa de polipropileno; tornillos de acero inoxidable; Anillo o Buna-N
- A prueba de agua: Hasta 30m

2. Sensor de temperatura y luminosidad



Medición y registro de temperatura e iluminación natural en ambientes exteriores. Para monitoreo diversas aplicaciones, es colgante, sumergible, con indicador LED y de tamaño pequeño.

Nombre del modelo empleado: HOBO Pendant® Temperature/Light 64K Data Logger

Características

- Carcasa impermeable para uso húmedo o subacuático
- Lectura de datos en menos de 30 segundos a través de una interfaz USB óptica
- Compatible con el software HOBOWare y HOBOWare Pro para la configuración, realizar gráficos y análisis del registrador

Especificaciones técnicas

- Rango de temperatura: -20° a 70°C
- Precisión de temperatura: $\pm 0.53^{\circ}\text{C}$ desde 0° a 50°C
- Resolución de temperatura: 0.14°C a 25°C
- Tiempo de respuesta de temperatura: 10 minutos en aire a 2m/s. 5 minutos en agua
- Rango de luz: 0 a 320000 lux (0 a 30000 lumens/ft²)
- Precisión de luz: Diseñado para niveles relativos de luz
- Rango de operación: -20° a 50°C en agua, -20 a 70°C en aire
- Modos de memoria: Cuando está llena o sobrescribir datos
- Tiempo de respuesta: 5 minutos en agua; 10 minutos en el aire a 2m/s
- Tipo de batería: CR-2032 3-Voltios
- Duración de batería: Típicamente 1 año
- Memoria: 64KB 28000 mediciones aproximadamente
- Materiales: Carcasa de polipropileno; tornillos de acero inoxidable; Anillo o Buna-N
- A prueba de agua: Hasta 30m
- Encerramiento: IP68

3. Lectura de datos de los sensores (*read out*)

Una vez se ha terminado el período de monitoreo, se retira el sensor del agua, del ambiente o del espacio donde se encuentre ubicado, se deja en un ambiente fresco por unas horas y se conecta a la Base óptica para realizar la descarga de datos en el programa HOBOWare que es de acceso libre en la página web de la empresa. La conexión Sensor-Base óptica-PC se ilustra en la siguiente figura:

