

Co-Digestión Anaeróbica en un Digestor Doméstico para el Tratamiento de Lactosuero y  
Estiércol Bovino Generados en el Instituto Técnico Agrícola De Cáchira

Juan Guillermo Jaramillo Arango y Paula Yulieth Rodríguez Cortés

Directora

Liliana del Pilar Castro Molano

PhD en Ingeniería Química

Codirectores

Humberto Escalante Hernández

PhD en Ingeniería Química

Jaime Jaimes-Estévez

MSc. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2020

## Dedicatorias

*A mi madre por todo el cariño que me ha entregado, por ser mi refugio, mi compañera de vida y mi más grande meta. A mi padre por escoger serlo, por su apoyo, su pedagogía y la imparcialidad de su juicio. A mis hermanas por asistirme cada vez que lo necesité. A mi hermano menor por infundirme alegría y orgullo. A mis tías y tíos por alentarme incasablemente a ser un profesional. A mis abuelos por haberme regalado lo mejor de cada uno. A mis amigos por ofrecerme perspectiva. A los docentes cimitarreños por darme las herramientas para encontrar mi vocación. A la sede UIS Málaga por sentar con excelencia mis bases y por su inigualable acogida. A la escuela de ingeniería química por enseñarme mis verdaderas capacidades, a sus profesores por obsequiarme inteligencia y a sus técnicos por llenarme de consejos. A mis directores por enseñarme mucho más que termodinámica, por ver mi potencial y creer en él. A mi familia anaeróbica por cada reto, instrucción y consejo dado. A la comunidad del Instituto Técnico Agrícola de Cáchira por su participación, paciencia y fraternidad. A mi compañera de trabajo por su estoicismo y su indispensable ayuda. A la universidad por mostrarme la valía del conocimiento y del bien público.*

*Dedico este logro a mi madre,  
Gloria Edicely Jaramillo Arango,  
por ser tan buena madre,  
por ser suficiente  
y necesaria.*

*Juan Guillermo Jaramillo Arango*

*Gracias a mi hermano Cristian David, por haber sido mi compañero, mi mejor amigo, mi alentador, por haber creído en mí desde siempre, por ahora ser el motivo de mis logros, y por haber sido el mejor hermano que alguien puede pedir, gracias porque aún después de la muerte, sigue enseñándome lo que significa vivir. A mi madre, que, con cada caricia, cada alimento, cada palabra, cada sacrificio solo demuestra cuán grande es su corazón, a mi papá, que, con su valentía, trabajo duro y palabras de aliento, impulsó lo que soy ahora. A mi hermanita Luciana, que llegó a este mundo en el momento correcto, a mis hermanos Sergio y Kevin, que han creído en mí desde siempre.*

*A mi tía Amparo y mi prima Yamile, por el apoyo incondicional y el amor manifestado en cada una de sus acciones, a mis primos Camila, Fredy y Nicolás por ser parte de esto.*

*A mis profesores del colegio, y a mis profesores de la universidad, en especial a la profesora Liliana, al profesor Humberto y a Jaime, por cada una de sus enseñanzas, el apoyo y la confianza brindada.*

*A Mayra, Camila, Cesar, Paula A, Kathe, Paula B, Faider, Clara, Elkin, Daniela, Silvia, Angie y Andrea, por haber sido un apoyo en el momento más oscuro de mi vida, por acompañarme en momentos duros y por siempre tener una palabra de aliento.*

*A Juan Guillermo, por haber sido mi compañero en el desarrollo de este trabajo, por la paciencia y por la entrega.*

*A mis demás familiares, amigos, compañeros y conocidos que aportaron su grano de arena para mi crecimiento personal y académico.*

*Este logro es más de ustedes, que mío.*

*Paula Yulieth Rodríguez Cortés*

### **Agradecimientos**

A nuestra alma máter, la Universidad Industrial de Santander, por recibirnos en su seno y brindarnos el conocimiento necesario para enfrentar la academia y la vida.

A la Escuela de Ingeniería Química y a cada uno de los profesores que hicieron parte de nuestra formación académica, por cada consejo y cada muestra de afecto a través de sus enseñanzas.

Al grupo de investigación INTERFASE, a la familia del Laboratorio de Digestión Anaeróbica y a cada uno de sus técnicos y profesionales, por sus enseñanzas y cuidados.

A la profesora Liliana Castro, por encomendarnos este enriquecedor trabajo, por la confianza brindada, por el conocimiento compartido y por cada uno de los consejos dados. Al profesor Humberto Escalante por su experiencia, paciencia, dedicación y por cada uno de sus aportes en el momento oportuno. A Jaime Jaimes, por el apoyo incondicional y por dedicarse arduamente a ser nuestro instructor. A los tres, mil gracias, sin su exigencia y conocimientos esto no sería posible.

Gracias al Instituto Técnico Agrícola de Cáchira, a su rector, el profesor Eric Vera, al zootecnista Mauricio Bello, a don Ovidio, a don Héctor y toda su comunidad educativa por mostrarse siempre prestos a ayudar, por permitirnos a través de la práctica enamorarnos de la digestión anaeróbica y por recordarnos el fin último de la academia.

## Contenido

	Pág.
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	19
2. Objetivo General.....	19
3. Objetivos Específicos.....	19
4. Metodología .....	20
4.1. Etapa 1: instalación y puesta en marcha del BDG .....	20
4.1.1. Información del caso de estudio.....	20
4.1.2. Recolección estiércol bovino y lactosuero.....	21
4.1.3. Instalación del BDG.....	21
4.1.4. Puesta en marcha del BDG .....	23
4.2. Etapa 2: Seguimiento bioquímico y microbiológico del proceso .....	24
4.2.1. Evaluación del proceso de digestión anaeróbica a escala doméstica .....	24
4.2.2. Métodos analíticos .....	26
4.3. Etapa 3: Análisis de las interacciones térmicas del biodigestor con el ambiente .....	26
5. Resultados .....	32
5.1. Puesta en marcha del BDG.....	32
5.2. Evaluación del proceso de digestión anaerobia a escala doméstica .....	33

5.2.1. Bioquímica del proceso.....36

5.2.2. Comportamiento microbiológico .....38

5.3. Rendimientos del proceso.....39

5.4. Calidad del digerido .....42

5.4.1. Remoción de materia orgánica: comportamiento de la DQO y los SV.....42

5.4.2. Remoción de materia orgánica: Concentración de fosfatos .....43

5.5. Comportamiento térmico del BDG .....46

5.5.1. Perfiles de temperatura promedio.....46

3.5.2. Transferencia de calor entre los sistemas implicados .....48

4. Conclusiones .....50

Referencias Bibliográficas.....51

**Tabla de Apéndices**

	Pág.
Apéndice A. Balance de masa en el tanque de mezcla.....	56
Apéndice B. Balance de Energía .....	60
Apéndice C. Manual de operación de un BDG rural.....	70
Apéndice D. Especificaciones técnicas de los sensores .....	71
Apéndice E. Ruta metabólica generalizada de la Digestión Anaeróbica.....	75

**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de operación para el proceso de MonoDA .....	25
Tabla 2. Volumen alimentado por componente y parámetros de CoDA en función de $f_{LS}$ .....	25
Tabla 3. Comparación del alimento y el efluente en la puesta en marcha del digestor .....	32
Tabla 4. Rendimientos del proceso y del reactor para MonoDA, CoDA y otros estudios .....	41
Tabla 5. Resultados muestreo semanal sustratos, parámetros y dimensiones del biodigestor ..	59
Tabla 6. Caudal alimentado de cada componente para cada fase.....	59
Tabla 7. Perfil promedio diario de temperatura ambiente, slurry y suelo .....	66
Tabla 8. Datos para la estimación de la radiación solar directa.....	67
Tabla 9. Propiedades, dimensiones y constantes.....	68
Tabla 10. Resultados del balance de energía .....	69

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 . Diagrama de flujo de la metodología.....	20
Figura 2 . Componentes del sistema anaerobio.....	22
Figura 3 . Proceso de instalación .....	23
Figura 4 . Ubicación de los sensores e ilustración de los sistemas involucrados .....	27
Figura 5 . Perfil de ácidos grasos volátiles en el digestor.....	34
Figura 6. Perfiles de pH y C. Buffer (AGV/AT) durante todo el proceso .....	35
Figura 7. Concentraciones de AGV para MonoDA y CoDA . .....	37
Figura 8. Relación ácido propiónico/ácido acético para MonoDA y CoDA.....	38
Figura 9. Comportamiento de la AME durante todo el proceso de MonoDA y CoDA.....	39
Figura 10. Producción de biogás diaria durante cada periodo.....	40
Figura 11. Porcentaje de remoción de SV y DQO .....	42
Figura 12. Contenido de fosfatos en la entrada y salida durante todo el proceso .....	43
Figura 13. Potencial de Biometanización Residual.....	45
Figura 14. Perfiles promedio horarios registrados y estimados.....	46
Figura 15. Transferencia de calor promedio en el día y en la noche.....	48
Figura 16. Diagrama del proceso de mezclado.....	57
Figura 17. Manual de operación de un biodigestor rural, vista frontal y posterior .....	70
Figura 18. Manual de operación de un biodigestor rural, vista interior .....	70
Figura 19. Sensor Datalogger de temperatura.....	71

Figura 20. Sensor Datalogger de temperatura e iluminancia ..... 72

Figura 21. Sensor Datalogger de temperatura e iluminancia ..... 74

Figura 22. Ruta metabólica generalizada para DA..... 75

### Glosario

- $\alpha_b$** : difusividad térmica del biogás
- AGV**: ácidos grasos volátiles
- AGVt**: ácidos grasos volátiles totales
- $A_i$** : área superficial del lodo
- $A_m$** : área de la manga plástica
- AME**: actividad metanogénica específica
- AT**: alcalinidad total
- $\beta_b$** : coeficiente térmico de expansión del biogás
- BDG**: biodigestor
- BDGs**: biodigestores
- CoDA**: co-digestión anaeróbica
- $C_{p,v}$** : capacidad calorífica del aire ambiental (viento)
- $C_{p,l}$** : capacidad calorífica del lodo
- DA**: digestión anaeróbica
- DQO**: demanda química de oxígeno
- EB**: estiércol bovino
- EBR**: ensayo de biometanización residual
- $e_{geomembrana}$** : espesor de la geomembrana
- $\xi_i$** : emisividad del lodo
- $\xi_m$** : emisividad de la manga plástica
- $f_{EB}$** : fracción de estiércol bovino en el alimento
- FID**: flame ionization detector (detector de ionización de llama)
- $F_{lum}$** : factor de iluminancia

**$f_{LS}$** : fracción de lactosuero en el alimento

**$f_m$** : factor de visión manga-lodo

**$F_s$** : factor de sombreo

**$g$** : aceleración de la gravedad

**$h_{c,m-l}$** : coeficiente de intercambio de calor convectivo entre la manga y el lodo

**$h_{c,m-v}$** : coeficiente de intercambio de calor convectivo entre la manga y el viento

**$I_{amb}$** : iluminancia ambiental

**ITAC**: Instituto Técnico Agrícola de Cáchira

**$k_b$** : conductividad térmica del biogás

**$k_{geomembrana}$** : conductividad térmica de la geomembrana

**$k_v$** : conductividad térmica del aire ambiental (viento)

**LS**: lactosuero

**$L_m$** : longitud característica de la manga plástica

**$\dot{m}_{in}$** : caudal discontinuo de alimentación

**MonoDA**: monodigestión anaeróbica

**$Nu$** : número de Nusselt

**$\sigma$** : constante de Stefan-Boltzman

**PEB**: producción específica de biogás

**$Pr$** : número de Prandtl

**PVC**: policloruro de vinilo

**$Q_{c,m-l}$** : calor transferido por mecanismo convectivo entre la manga y el lodo

**$Q_{c,m-v}$** : calor transferido por mecanismo convectivo entre la manga y el viento

**$Q_{cd,l-in}$** : calor transferido por mecanismo conductivo entre lodo y el alimento

- $Q_{cd,l-s}$** : calor transferido por mecanismo conductivo entre lodo y el suelo
- $Q_{r,m-c}$** : calor transferido por mecanismo radiativo entre la manga y el cielo
- $Q_{r,m-l}$** : calor transferido por mecanismo radiativo entre la manga y el lodo
- $Q_{lat}$** : calor transferido al lodo en el tiempo
- R**: radiación solar para cielos despejados
- Ra**: número de Rayleigh
- Re**: número de Reynolds
- $S_m$** : radiación solar recibida por la manga plástica
- SV**: sólidos volátiles
- $T_{amb}$** : temperatura ambiental
- $T_b$** : temperatura del biogás
- $T_c$** : temperatura del cielo como cuerpo negro
- TCD**: thermal conductivity detector (detector de conductividad térmica)
- $T_l$** : temperatura del lodo
- $T_m$** : temperatura de la manga plástica
- TRH**: tiempo de retención hidráulica
- $T_s$** : temperatura del suelo
- $\mu_v$** : viscosidad dinámica del aire ambiental (viento)
- $\nu_b$** : viscosidad cinemática del biogás
- $\nu$** : viscosidad cinemática del aire ambiental (viento)
- $\langle V \rangle_v$** : velocidad del viento
- VCO**: velocidad de carga orgánica
- VPB**: velocidad de producción de biogás

## Resumen

**Título:** Co-Digestión Anaeróbica en un Digestor Doméstico para el Tratamiento de Lactosuero y Estiércol Bovino Generados en el Instituto Técnico Agrícola De Cáchira<sup>1</sup>

**Autores:** Juan Guillermo Jaramillo Arango, Paula Yulieth Rodríguez Cortés<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** Co-digestión Anaeróbica, Lactosuero, Escala doméstica, Psicofilia

**Descripción:** La carga orgánica de los residuos lactosuero (LS: 56.2 gSV/L) y estiércol bovino (EB: 124.9 gSV/L) hace que sean sustratos aprovechables mediante la co-digestión anaeróbica (CoDA), esta ha demostrado estabilidad a escala laboratorio, pero no ha sido evaluada a escala doméstica. El Instituto Técnico Agrícola de Cáchira (ITAC) es uno de los 1,245 colegios con modalidad agropecuaria del país, genera 48 kg EB/d y produce 50 L/d de leche que son transformados en queso, tiene un suministro limitado de gas natural y su temperatura media ( $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) está por debajo de la recomendada. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un proceso de CoDA de LS y EB a escala doméstica en el ITAC bajo sus condiciones locales. Se instaló un biodigestor (BDG), se evaluó el efecto de la adición de LS en la bioquímica del proceso y se estudió su comportamiento térmico. La evaluación de la CoDA indicó que no hubo inhibición. Se evaluaron los Ácidos Grasos Volátiles totales (AGVt: 600 mgAc.Acético/L), la Actividad Metanogénica Específica (AME: 0.0733 gDQOCH<sub>4</sub>/gSVd), el rendimiento del proceso (3.84 Nm<sup>3</sup>/kg SV/m<sup>3</sup><sub>operación</sub> d), el porcentaje de remoción de Sólidos Volátiles (SV): 87% y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO): 73%. De acuerdo con la AME final alcanzada, la población metanogénica pudo adaptarse al co-sustrato. Se registró una temperatura ambiente de  $17.3 \pm 3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La temperatura del lodo ( $20.6 \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y del suelo ( $20.4 \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se mantuvieron aproximadamente constantes. Se infirió que la manga y el biogás ofrecieron resistencia al intercambio entre el lodo y el ambiente, mientras que el suelo sirvió como sumidero de calor (150 w), esto demostró que el aislamiento con el suelo tiene un mayor efecto sobre la temperatura del lodo que el aislamiento con el ambiente y que es necesario usar materiales traslucidos para elaborar el BDG.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora Liliana Castro. Codirector Humberto Escalante. Codirector Jaime Jaimes.

### Abstract

**Title:** Anaerobic Co-Digestion in a Domestic Digester for the Treatment of Cheese Whey and Bovine Manure Generated at the Technical Agricultural Institute of Cáchira<sup>3</sup>

**Authors:** Juan Guillermo Jaramillo Arango, Paula Yulieth Rodríguez Cortés<sup>4</sup>

**Key Words:** Anaerobic Co-digestion, Cheese Whey, Domestic Escala, Psychrophilia.

**Description:** The organic load of the Cheese Whey (CW: 56.2 gVS/L) and Cow Manure (CM: 124.9 gVS/L) makes them usable substrates through anaerobic co-digestion (CoDA), this has demonstrated stability on a laboratory scale, but it has not been evaluated on a domestic scale. The Cáchira's Technical Agricultural Institute (ITAC) is one of the 1,245 agricultural schools in the country, generates 48 kgCM/d and produces 50 L/d of milk that is transformed into cheese, has a limited supply of natural gas and its average ambient temperature (<20°C) is below recommended. The objective of this research was to develop a domestic scale CW and CM ACoD process at ITAC under their local conditions. A biodigester (BDG) was installed, the effect of the addition of CW on the biochemistry of the process was evaluated and its thermal behavior was studied. A ACoD evaluation indicated that there was no inhibition. Total Volatile Fatty Acids (VFAt: 600 mg Acetic Acid/L), Specific Methanogenic Activity (SMA: 0.0733 gCODCH<sub>4</sub>/gVSd), process performance (3.84 Nm<sup>3</sup>/kgVS/m<sup>3</sup><sub>operation</sub> d), removal percentage Volatile Solids (SV): 87% and Chemical Oxygen Demand (COD): 73%. According to the final SMA reached, the methanogenic population was able to adapt to the co-substrate. An ambient temperature of 17.3 ± 3.3°C was recorded. The temperature of the slurry (20.6 ± 0.3°C) and the ground (20.4 ± 0.2 ° C) remained approximately constant. It was inferred that the biogas and biogas holder offered resistance to the exchange between the slurry and the environment, while the ground served as a heat sink (150 w), this showed that the insulation with the ground has a greater effect on the temperature of the slurry than isolation from the environment, and that it is necessary to use translucent materials to make the BDG.

---

<sup>3</sup> Bachelor Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora Liliana Castro. Codirector Humberto Escalante. Codirector Jaime Jaimes.

## Introducción

Colombia tiene más de un millón de  $\text{km}^2$  de extensión, de los cuales el 94% corresponden a zona rural. Cerca del 52% de estas zonas tienen difícil acceso, no están interconectadas vía terrestre y su población no tiene cobertura de la red nacional de gas combustible (Escalante, et al., 2016). La energía en las zonas rurales se suple mediante la generación eléctrica a partir de diésel, el uso de leña o gas propano; conllevando altos costos (transporte, combustible, almacenamiento) y generando efecto invernadero. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario promover procesos prácticos de autogeneración de energía, sostenible y de bajo costo para las zonas rurales.

La digestión anaeróbica (DA) transforma residuos de alto contenido nutricional en un biogás (combustible) y un lodo (digerido) con propiedades fertilizantes. La DA se lleva a cabo en cuatro etapas bioquímicas consecutivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El biogás producido tiene en promedio concentraciones de metano entre 60%-70% y puede transformarse a energía calórica o eléctrica (Buysman, 2009). El contenido nutricional del digerido (21-200 mg  $\text{PO}_4\text{-P/L}$ , 100-949 mg  $\text{NH}_4\text{-N}$  y 21-1049 mg  $\text{Ca/L}$ ) lo convierte en una materia prima para ser usado como recuperador de suelos (Castro, et al., 2017).

En Colombia, a nivel rural se lleva a cabo la DA en biodigestores de bajo costo (BDG) que se caracterizan por la ausencia de dispositivos de mezcla y/o sistemas de calefacción (Castro, et al., 2017). El rendimiento de la DA es influenciado por la composición nutricional del sustrato (residuo), la temperatura (clima y radiación solar del lugar de instalación) y tipo de inóculo. El inóculo es la materia orgánica estabilizada previamente a la operación semicontinúa del BDG. La literatura, reporta rendimientos de producción de biogás entre 0.1 y  $0.36 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg SV}$ , con temperaturas de operación que van de 16 a  $25^\circ\text{C}$

(Ferrer-Martí, et al., 2018), utilizando estiércoles, residuos de poda, ensilajes, desechos agroindustriales y de alimentos (Martí-Herrero, et al., 2014).

Un escenario apropiado para la difusión y enseñanza de la DA es el sector rural educativo. Colombia actualmente tiene 1245 colegios con modalidad técnica y agropecuaria (MEN, 2019), destacándose el Instituto Técnico Agrícola de Cáchira (ITAC), ubicado en el departamento de Norte de Santander (7°44'7.0"N 73°3'6.0"O, temperatura media de  $17.3 \pm 3.3$  °C). El ITAC cuenta con 170 estudiantes, que son formados como futuros empresarios agropecuarios. Una de sus prácticas pecuarias consiste en mantener 5 vacas en ordeño que producen 50 litros de leche y generan 40 kg de estiércol bovino (EB) diariamente. Del estiércol generado en el ITAC, 10 kg/d son usados en el proceso de lombricultura y el restante se aplica directamente a los cultivos como abono. Por su parte, la leche que no es destinada al mantenimiento de terneros es vendida a Damalac, una pequeña empresa regional líder en la producción de quesos (tipo pera, doble crema y semisalado). Diariamente Damalac procesa 2,500 L de leche produciendo 250 kg de queso y obteniendo como residuo 2,250 L de lactosuero (LS) que no es gestionado ni valorizado. Además, Damalac no dispone de red de gas domiciliario y usa leña para suplir sus requerimientos energéticos. Por lo anterior, la apropiación teórica y experimental de la DA para tratar el LS y el EB, es una excelente alternativa en el proceso formativo de futuros empresarios agropecuarios que lleva a cabo el ITAC.

Sin embargo, al digestar estos residuos se debe considerar: a) el LS presenta inhibición por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) provenientes de la fermentación de carbohidratos, lípidos y proteínas y b) el EB, aun cuando posee buena carga orgánica (60.81% - 76.75%) sus rendimientos

no son elevados, siendo del orden de  $0.32 \text{ (m}^3_{\text{biogás}}/\text{kg SV)}$  debido a la baja presencia de macromoléculas complementarias como lípidos y proteínas (Ferrer Martí, et al., 2011).

Con el fin de mejorar los rendimientos de producción de biogás y la calidad nutricional del digerido, se ha planteado la Co-digestión anaeróbica (CoDA); estrategia que permite la digestión simultánea de dos o más sustratos (Mata-Alvarez, et al., 2014). En la CoDA cada co-sustrato aporta un nutriente complementario (proteína, lípido o carbohidrato) para generar una mezcla sinérgica; con equilibrio nutricional y por ende altos rendimientos en biogás (Shah, et al., 2015).

En 2012, Víquez llevó a cabo la CoDA de EB y de LS en un biodigestor doméstico (Víquez, 2012). Este trabajo sobresale por la escala de diseño ( $42 \text{ m}^3$ ) y su rendimiento ( $0.29 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kgSV}$ ); sin embargo la relación de mezcla ( $0.63 \text{ kgSV}_{\text{LS}}/\text{kgSV}_{\text{EB}}$ ) evidencia que el proceso digestó un gran volumen de EB y aún no se estudió la sinergia de los cosustratos. Escalante y colaboradores (Jaimes-Estévez, et al., 2018) estudiaron la monodigestión del LS, siguiendo el protocolo del potencial de metanización (PBM), identificando que este residuo tiene un máximo rendimiento de  $0.56 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kgSV}$ ; cuando la DA se realiza a  $35^{\circ}\text{C}$ , en operación batch. Estos resultados permiten evidenciar que las propiedades lípidicas del LS si son excelentes para producir biogás; pero que se requiere un control de su acidez en la ruta metabólica (Jaimes-Estévez, et al., 2018). De esta manera, el estudio sinérgico del LS y el EB lo realizaron Jaimes y colaboradores, encontrando que la mejor relación de mezcla corresponde a  $1.9 \text{ kgSV}_{\text{LS}} / \text{kgSV}_{\text{EB}}$ . Adicionalmente, se exploró la influencia de la temperatura en la CoDA; y para  $15^{\circ}\text{C}$  se obtuvo un rendimiento de  $0.45 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kgSV}$  (Escalante, et al., 2017). Estos resultados permitieron a Carrillo & Portillo evaluar la CoDA de LS y EB, bajo las condiciones obtenidas por Jaimes y colaboradores, en operación semicontinua en un bioreactor tubular a escala laboratorio. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente dando un rendimiento de  $0.24 \text{ m}^3_{\text{biogás}}/\text{kgSV}$  (Carrillo & Portillo, 2018). El análisis

del estado de arte anterior evidencia que la CoDA de LS y EB brinda un excelente rendimiento siempre y cuando se mantenga una relación de mezcla sinérgica. Sin embargo, los estudios para aplicar la CoDA LS:EB a escala doméstica son limitadas y no se realiza monitoreo en condiciones psicrófilas del comportamiento bioquímico y térmico.

Cáchira presenta temperatura psicrófila ( $17.3 \pm 3.3^{\circ}\text{C}$ ) la cual puede afectar la actividad microbiana y por ende reducir la producción de biogás (Jaimes-Estévez, et al., 2018). Sin embargo, el análisis arriba expuesto permite inferir que el ITAC puede implementar este proceso y llegar a obtener excelentes resultados. Es por esto que se estableció un proyecto de interés de la UIS para hacer transferencia de la DA y se instaló un BDG de  $8\text{m}^3$  en el ITAC para digerir el LS y EB bajo condiciones de temperatura locales (psicrófilas) y estudiar su comportamiento bioquímico y térmico.

Este trabajo fin de carrera hace parte del proyecto de extensión solidaria: “*Desarrollo de un plan de transferencia tecnológico para valorizar residuos pecuarios del Instituto Técnico de Cádiz mediante digestión anaeróbica*” (código VIE-UIS 6450-1849) en alianza con la empresa Sistema.Bio® (fabricante mundial de digestores de bajo costo), el ITAC y el grupo INTERFASE - UIS.

## **1. Objetivos**

### **2. Objetivo General**

Establecer un proceso de CoDA a escala doméstica, bajo condiciones ambientales del orden psicrófilico, para tratar los residuos LS y EB generados por las actividades pecuarias del ITAC.

### **3. Objetivos Específicos**

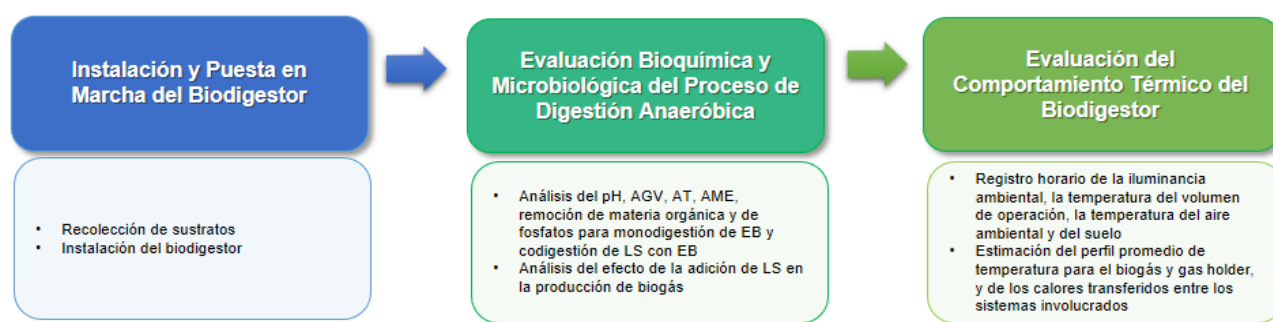
- Instalar y poner en marcha un sistema de biodigestión anaeróbica de escala doméstica en el Instituto Técnico Agrícola de Cháchira.
- Estudiar el comportamiento bioquímico del sistema de biodigestión debido a la adición de lactosuero como co-sustrato.
- Estudiar el comportamiento térmico del sistema de biodigestión debido a la ausencia de aislantes.

## 4. Metodología

Para estudiar el comportamiento de la Co-digestión del LS con EB, la metodología de este estudio fue distribuida en tres etapas como se muestra en la Figura 1. La primera corresponde a la instalación y puesta en marcha del BDG, la segunda etapa contempla el seguimiento bioquímico y microbiológico del proceso y en la última se realizó el análisis de las interacciones térmicas del biodigestor con el ambiente.

**Figura 1**

*Diagrama de flujo de la metodología*



### 4.1. Etapa 1: instalación y puesta en marcha del BDG

#### 4.1.1. Información del caso de estudio

El ITAC se encuentra ubicado sobre el kilómetro 1 de la vía Cáchira-Bucaramanga, en el departamento de Norte de Santander ( $7^{\circ}44'7.0''N$   $73^{\circ}3'6.0''O$ ) a una altura de 1,882 m.s.n.m. Esta región presenta una temperatura media ambiente de  $17.3 \pm 3.3$  °C con una precipitación de 500 mm/año. Una gran parte del municipio (más de 9 mil hectáreas) forma parte del Páramo de Santurbán, fuente hídrica para Santander y Norte de Santander. Dada su ubicación geográfica, la región tiene una única vía de acceso que limita el suministro de gas natural. El ITAC cuenta con 17 cabezas de ganado bovino con un peso entre 100 y 500 kg y una genética que exhibe cruzamientos F1 de Holstein-Normando, Holstein-Ayshire y Holstein-Jersey, razas comunes en el sector lechero.

#### **4.1.2. *Recolección estiércol bovino y lactosuero***

El EB se recolectó diariamente y se almacenó en una zona del establo destinada para este fin. El LS fue suministrado por la empresa Damalac, ubicada a 1 km del ITAC, el cual fue almacenado en tanques plásticos ubicados en el establo.

#### **4.1.3. *Instalación del BDG***

Se instaló un BDG doméstico (Sistema 8) donado a la institución por la empresa Sistema.Bio® (Sistema.Bio, 2020). El sistema anaerobio está provisto por los siguientes componentes, los cuales se ilustran en la

Figura 2

- **Tanque de mezcla:** Este tanque es utilizado para mezclar el EB y el LS. Las dimensiones del tanque son 0.5 m de alto, 1 m de largo y 0.5 de ancho, guardando una forma elíptica. El material es de plástico.
- **Biodigestor:** El cuerpo del reactor es de geomembrana oscura de alta densidad, con un volumen total de 8m<sup>3</sup> de los cuales el 65% es para la fase líquida y el 35% es ocupado por la fase gaseosa, tiene dos tubos de PVC ubicados en los extremos, uno recibe el afluente y el otro libera el digerido que se produce.
- **Válvula de seguridad:** Esta válvula es utilizada para mantener una presión estable dentro del biodigestor, hecha de PVC, con un diámetro de 1 pulgada.
- **Tanque de digerido:** Este tanque almacena el digerido producido. Las dimensiones del tanque son: 1 m de largo, 0.5 m de ancho y 1 m de profundo, está fabricado a partir de geomembrana de

alta densidad al igual que el biodigestor. Su capacidad volumétrica es de  $0.5 \text{ m}^3$ . Se sembraron papiros como plantas acuáticas en la superficie del tanque.

- Filtro: Es un tubo hecho de PVC que contiene en su interior esponjillas de acero previamente oxidadas. El óxido de hierro reacciona con el ácido sulfhídrico presente en el biogás captándolo como azufre elemental, este tratamiento elimina malos olores y problemas de toxicidad.
- Estufa: Fabricada de acero inoxidable, está equipada con una válvula para dar paso al biogás y con dos quemadores para regular la llama.

Adicionalmente, fue necesario instalar un gasómetro y un reservorio para garantizar el correcto aprovechamiento del biogás producido.

- Gasómetro: Este medidor G1.6 der-izq es de marca Humcar para uso residencial, y requiere de un flujo mínimo de  $0.016 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- Reservorio: Se fabricó un reservorio para almacenar el biogás, hecho del mismo material que el biodigestor y tanque de digerido. Su volumen es de  $2 \text{ m}^3$ .
- Accesorios: Se instalaron 4 válvulas de bola, de PVC y 1 pulgada de diámetro, a lo largo de 200 m de tubería plástica de 1 pulgada que conecta el biodigestor con la estufa. La válvula 1 permite el mantenimiento del gasómetro y del filtro, las válvulas 2 y 3 permiten o cierran el paso del biogás antes y después del reservorio, la válvula 4 permite o cierra el paso hacia la estufa.

## Figura 2

Componentes del sistema anaerobio



En la Figura 3

Proceso de instalación se representa el proceso de instalación del BDG en el ITAC

### Figura 3

*Proceso de instalación*



#### 4.1.4. Puesta en marcha del BDG

Estudios anteriores demostraron que, para un adecuado arranque de digestores anaerobios con EB, la alimentación inicial debe ser agua y EB en una relación 1:3, esto garantiza un adecuado potencial de metano y actividad microbiana (Martí Herrero, 2008). En este sentido, la puesta en marcha consistió en una fase discontinua (*batch*) con una alimentación única de 1,300 kg de EB y 3,900 L de agua. Lo anterior con el fin de adaptar las comunidades bacterianas presentes en el estiércol a las condiciones del sistema durante 3 meses.

## 4.2. Etapa 2: Seguimiento bioquímico y microbiológico del proceso

### 4.2.1. Evaluación del proceso de digestión anaeróbica a escala doméstica

El proceso de digestión anaeróbica se llevó a cabo en dos periodos con alimentación semicontinua: *periodo a*) Monodigestión (MonoDA) de la mezcla EB:agua (1:3 v/v) y *periodo b*) CoDA de la mezcla LS:EB:agua. En cada periodo se estudió el comportamiento bioquímico y microbiológico del proceso en los caudales de entrada y salida del digestor. El comportamiento bioquímico consistió en la determinación del contenido de ácidos grasos volátiles totales (AGVt) y la concentración de AGV entre 1 y 6 carbonos. El comportamiento microbiológico se fundamentó en la determinación de la Actividad Metanogénica Específica (AME). Las muestras del alimento y del efluente fueron tomadas semanalmente para luego ser transportadas de inmediato en botellas plásticas dentro de una nevera de poliestireno expandido. Vale la pena mencionar que estas pruebas se realizaron por triplicado.

Para evaluar la producción de biogás se determinó la velocidad de producción de biogás (VPB) y la producción específica de biogás (PEB) en función del volumen del digestor y la materia orgánica alimentada, respectivamente. El volumen de biogás producido fue medido con el gasómetro referido en la sección 2.1.3. La medición de volumen de gas se reporta en condiciones normales de gas seco. La calidad de biogás (porcentaje de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) se determinó al finalizar cada etapa mediante cromatografía de gases.

Con el fin de evaluar la calidad del digerido, se realizó un seguimiento semanal del contenido de materia orgánica, representada por la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los SV y la concentración de fosfatos a la salida del BDG. Además, se determinó el contenido de biogás residual en el digerido a través del Ensayo de Biometanización Residual (EBR) para cada una de las etapas. En la Tabla 1 se presentan las condiciones de operación para el proceso de MonoDA

**Tabla 1***Condiciones de operación para el proceso de MonoDA*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
VCO [kg SV/m <sup>3</sup> operación d]	0.37
T [°C]	17
TRH [d]	75

Debido a que las características ácidas del LS pueden afectar el proceso, se planteó una estrategia de alimentación donde de manera periódica se reemplazó el agua de la mezcla, aumentando la fracción de LS ( $f_{LS}$ ) en la corriente de entrada, hasta alcanzar una composición de  $f_{LS} = 0.7$  (70% LS, 30% EB), la cual es considerada como más favorable (Carrillo & Portillo, 2018). Las fracciones se evaluaron por periodos de alimentación de la siguiente forma  $f_{LS} = \{0.1; 0.3; 0.5; 0.7\}$  con fracción de estiércol en el alimento  $f_{EB} = 0.3$  constante (ver Apéndice A). El caudal alimentado de cada componente se presenta en la Tabla 2.

**Tabla 2***Volumen alimentado de cada componente y parámetros de la CoDA en función de  $f_{LS}$* 

	<b>Fracción LS</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>
<b>Volumen</b> [L]	<b>LS</b>	7	21	35	49
	<b>EB</b>	21	21	21	21
	<b>Agua</b>	42	28	14	0
	<b>Total Alimento</b>	70	70	70	70
<b>Parámetro</b>	<b>VCO [kg SV/m<sup>3</sup> operación d]</b>	0.46	0.54	0.58	0.73
	<b>T [°C]</b>	17	17	17	17
	<b>TRH [d]</b>	75	75	75	75

Los volúmenes de sustrato a cargar fueron cuantificados con probetas de 4L y mezclados en el tanque de alimentación dispuesto en la entrada del reactor.

#### 4.2.2. Métodos analíticos

El contenido de materia orgánica representada en los SV y la DQO fueron determinados mediante los métodos termogravimétrico (SM 2450 E) y calorimétrico (SM 5220-D; EPA 410.4), respectivamente, descrito por Standard Methods (APHA, 2005). Los AGVt y la AT fueron cuantificados por titulación (Jobling, et al., 2014). Para determinar los tipos de AGV presentes en las muestras, se realizó una caracterización por cromatografía de gases según el método expuesto por Raposo, *et al.*, (2013) con un detector FID, en un cromatógrafo Agilent 7890a, usando una columna capilar Carboxen 1010 plot e hidrógeno como gas de arrastre (flujo de 15 mL/min a una presión 40 kPa). El pH fue medido usando un potenciómetro de marca Metrohm 691. La calidad del biogás, representada en el porcentaje de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> fue determinada por cromatografía de gases utilizando un detector TCD en un cromatógrafo de marca GC-Agilent 78890, usando como gas de arrastre helio a 15 mL/min a una presión de 40 kPa, una columna Molosieve 5Å de tamiz molecular y una columna PORABOND Q empacada. El EBR y la AME se llevaron a cabo siguiendo el protocolo descrito por Astals, *et al.*, (2015).

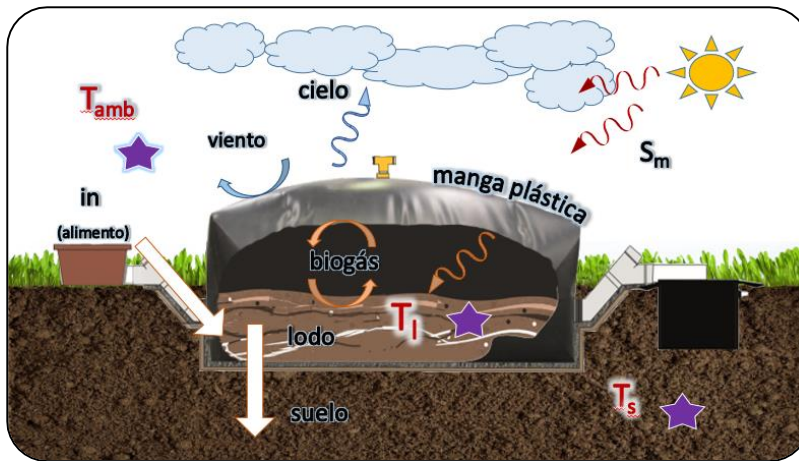
#### 4.3. Etapa 3: Análisis de las interacciones térmicas del biodigestor con el ambiente

Usualmente los BDGs instalados en sitios con temperatura ambiental baja (<20°C) son protegidos mediante el uso de invernaderos. La evaluación del comportamiento térmico consistió en determinar cómo afectó la ausencia de invernadero y de aislante en el suelo al BDG mediante el análisis de la temperatura de los sistemas involucrados y el intercambio de calor entre estos como lo ilustra la Figura 4. Para esto se realizó el registro horario de la iluminancia ambiental ( $I_{amb}$ ), la temperatura del lodo en el volumen de operación ( $T_l$ ), la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) y la temperatura del suelo ( $T_s$ )

durante 13 semanas. Posteriormente, aplicando un modelo de transferencia de calor unidimensional para BDGs en climas fríos (Perrigault, et al., 2012) se estimó el perfil promedio de temperatura del biogás ( $T_b$ ) y de la manga plástica que lo contiene ( $T_m$ ), así como la transferencia de calor entre los sistemas mencionados, con el fin de determinar cuál de ellos se comportó como sumidero de calor. Para llevar a cabo este estudio se instalaron tres *dataloggers* (fabricados por HOBO Pendant®) como se ilustra en la Figura 4. Las especificaciones técnicas de los sensores se encuentran en el **Apéndice D**. Especificaciones técnicas de los sensores Un mismo sensor realizó el registro de la  $T_{amb}$  y la  $I_{amb}$ , éste se ubicó a 2 m de altura y 3 m de distancia lineal del BDG. El sensor del lodo se sumergió 0.5 m dentro del fluido. El sensor del suelo fue enterrado a 1 m de profundidad y 1 m de distancia lineal del BDG.

**Figura 4**

*Ubicación de los sensores e ilustración de los sistemas involucrados*



**CONVENCIONES**

- $S_m$ : radiación solar directa en la manga plástica
- in*: alimento
- v*: viento (aire ambiental)
- c*: cielo
- m*: manga plástica
- b*: biogás
- l*: lodo
- s*: suelo

Sensor ☆  $T_{amb}$ : Temperatura aire ambiental,  $T_l$ : Temperatura lodo,  $T_s$ : Temperatura suelo

Con el fin de parametrizar el estado del tiempo climático se definió el factor de luminosidad ( $F_{lum}$ ) como la relación entre la iluminancia y su valor máximo registrado, como se muestra en la

ecuación (Ec. 1). Esta fracción es proporcional al grado de apantallamiento que la atmósfera ofrece al paso de la luz, es decir, da información sobre qué tan soleado o nuboso es el tiempo climático cuando  $F_{lum}$  tiende a 1 y 0 respectivamente.

$$F_{lum} = \frac{I_{amb}}{I_{amb,m\acute{a}x}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Para calcular el valor de la radiación  $S_m$  se tuvo en cuenta el  $F_{lum}$ , el factor de sombreo ( $F_s$ ), y la radiación solar promedio para cielos despejados ( $R$ ), como se muestra en la ecuación (Ec. 2). El  $F_s$  se definió como una variable adimensional que toma el valor de 1 si hay sombra sobre la manga plástica del digestor, y de 0 si no la hay. La  $R$  se estimó según lo expuesto en el Atlas de radiación solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia (Benavides, et al., 2017).

$$S_m = (1 - F_s) * F_{lum} * R \quad (\text{Ec. 2})$$

Para evaluar el comportamiento térmico del digestor fue necesario dar solución al balance de energía en la manga plástica, biogás y volumen de operación. Respecto a la primera, esta recibe energía del sol, disipa calor radiativamente hacia el ambiente y hacia el lodo en el volumen de operación, e intercambia calor convectivamente con el ambiente y el biogás. Entonces:

$$[S_m] - [Q_{r,m-c} + Q_{c,m-v} + Q_{c,m-l} + Q_{r,m-l}] = 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

El término  $Q_{r,m-c}$  indica el calor transferido por mecanismo radiativo desde la manga plástica hacia el ambiente (cielo). Esta transferencia se estimó a través de la ecuación 4.

$$Q_{r,m-c} = \sigma f_m \epsilon_m A_m (T_m^4 - T_c^4) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman,  $f_m$  el factor de visión entre la manga plástica y el cielo,  $\epsilon_m$  y  $A_m$  son la emisividad y el área de la manga.  $T_c$  es la temperatura equivalente del sistema *cielo*, la cual se estimó usando la ecuación 5.

$$T_c = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad (\text{Ec. 5})$$

El término  $Q_{c,m-v}$  hace referencia al calor que la geomembrana entrega al viento por mecanismo convectivo. Está descrito por la ecuación 6, donde el coeficiente de intercambio de calor convectivo ( $h_{c,m-v}$ ) es función de la longitud característica de la manga ( $L_m$ ), la conductividad térmica del aire ambiental ( $k_v$ ), su velocidad ( $\langle V \rangle_v$ ), viscosidad dinámica ( $\mu_v$ ) y cinemática ( $\nu_v$ ).

$$Q_{c,m-v} = h_{c,m-v} A_m (T_m - T_v) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$h_{c,m-v} = \frac{k_v}{L_m} (Nu_v) \quad (\text{Ec. 7})$$

$$Nu_v = \begin{cases} 0.664 Re_v^{1/2} Pr_v^{1/3} & \text{si } Re_v < 2 * 10^5 \\ 0.037 Re_v^{4/5} Pr_v^{1/3} & \text{si } Re_v > 3 * 10^6 \end{cases} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$Re_v = \frac{\langle V \rangle_v L_m}{\nu_v} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$Pr_v = \frac{C_{p,v} \mu_v}{k_v} \quad (\text{Ec. 10})$$

Los términos  $Q_{c,m-l}$  y  $Q_{r,m-l}$  se definen con las ecuaciones 11 y 16 respectivamente, describen el intercambio de calor por mecanismo convectivo y radiativo entre la geomembrana y lodo en el volumen de operación. Como puede verse en las ecuaciones 12, 13, 14 y 15, el coeficiente  $h_{c,m-l}$  depende de la  $L_m$ , la conductividad térmica ( $k_b$ ), difusividad térmica ( $\alpha_b$ ), coeficiente térmico de expansión ( $\beta_b$ ) y viscosidad cinemática ( $\nu_b$ ) del biogás.

$$Q_{c,m-l} = h_{c,m-l} A_m (T_m - T_l) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$h_{c,m-l} = \frac{k_b}{L_m} (Nu_b) \quad (\text{Ec. 12})$$

$$Nu_b = \begin{cases} 1 & \text{si } T_l < T_{amb} \\ 0.069 Ra_b^{1/2} Pr_b^{1/3} & \text{si } T_l > T_{amb} \end{cases} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$Ra_b = \frac{g\beta_b(T_m - T_l)L_m^3}{\alpha_b\nu_b} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$Pr_b = \frac{C_{p,b}\mu_b}{k_b} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$Q_{r,m-l} = \frac{\sigma A_m}{\frac{1-\epsilon_l}{\epsilon_l} \frac{A_m}{A_l} + \frac{1}{f_m} + \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m}} (T_m^4 - T_l^4) \quad (\text{Ec. 16})$$

En cuanto al balance en el sistema biogás, al no existir acumulación, el calor transmitido hacia este es igual al que abandona el sistema. Teniendo en cuenta que el biogás solo interacciona con la geomembrana y con el lodo, se define la  $T_b$  como lo muestra la ecuación 17.

$$T_b = \frac{T_m + T_l}{2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Finalmente, el balance de energía en el volumen de operación contempla el intercambio de calor con el suelo ( $Q_{cd,l-s}$ ) y la entrada del alimento ( $Q_{cd,l-in}$ ) por mecanismo conductivo, mientras que el término  $Q_{l,dt}$  hace referencia a la energía neta que entra o sale del lodo en el tiempo, lo cual queda descrito en las ecuaciones 18, 19 y 20.

$$[Q_{c,m-l} + Q_{r,m-l}] - [Q_{cd,l-s} + Q_{cd,l-in}] = Q_{l,dt} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$Q_{cd,l-s} = \frac{k_{geomembrana}}{e_{geomembrana}} A_s (T_l - T_s) \quad (\text{Ec. 19})$$

$$Q_{cd,l-in} = \dot{m}_{in} c_{p,l} (T_l - T_{amb}) \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde  $k_{geomembrana}$  es la conductividad térmica de la geomembrana y  $e_{geomembrana}$  es su espesor,  $A_s$  es el área total de contacto entre el suelo y el lodo,  $c_{p,l}$  es la capacidad calorífica del lodo y  $\dot{m}_{in}$  es el flujo semicontínuo de entrada. El procedimiento computacional para la depuración de los datos registrados se llevó a cabo usando programación en Visual Basic a través del software Microsoft Excel®, mientras que para la estimación de las variables de respuesta se utilizó el software TI-Nspire™ CX CAS

Student. Las propiedades, dimensiones y constantes utilizadas, así como las líneas de código usadas se encuentran en el Apéndice B.

## 5. Resultados

### 5.1. Puesta en marcha del BDG

La puesta en marcha del BDG, se llevó a cabo en operación discontinua durante 90 días con una única alimentación de 1,300 kg EB y 3,900 L agua. En la

Tabla 3 se presenta una comparación del alimento con respecto al efluente referente al contenido de materia orgánica y la actividad microbiana representada en la AME.

**Tabla 3**

*Comparación del alimento y el efluente en la puesta en marcha del digestor*

<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>	<b>Alimento</b>	<b>Efluente</b>
<b>SV/ST</b>	-	0.7	0.3
<b>AGVt</b>	mg Ac. Acético/L	840	480
<b>pH</b>	-	6.9	7.1
<b>AME</b>	gDQO CH <sub>4</sub> /gSV*d	0.013	0.054

Los SV presentaron un porcentaje de consumo total del 94%, mientras que la relación SV/ST descendió hasta 0.3, indicando que los microorganismos hicieron uso de la materia orgánica degradable para ser transformada. Además, la baja concentración de AGVt (480 mg Ac. Acético/L) y el pH neutro a la salida del sistema muestra que la operación de adaptación fue estable y que los AGVt entrantes fueron consumidos y transformados. Respecto a la AME, esta variable indica la actividad de los microorganismos metanógenos productores de biogás, dando información sobre la adaptación de la población microbiana. Para este estudio se encontró un valor final de 0.058 g DQO CH<sub>4</sub>/g SV d, el cual

representa un aumento del 315% respecto de la AME inicial. Estos valores son comparables con Castro *et al.* (2017), quienes mencionan que una actividad de producción de metano a partir de EB entre 0.02 y 0.04 g DQO CH<sub>4</sub>/g SV d es conveniente para un proceso de digestión empleando EB diluido como inóculo.

## 5.2. Evaluación del proceso de digestión anaerobia a escala doméstica

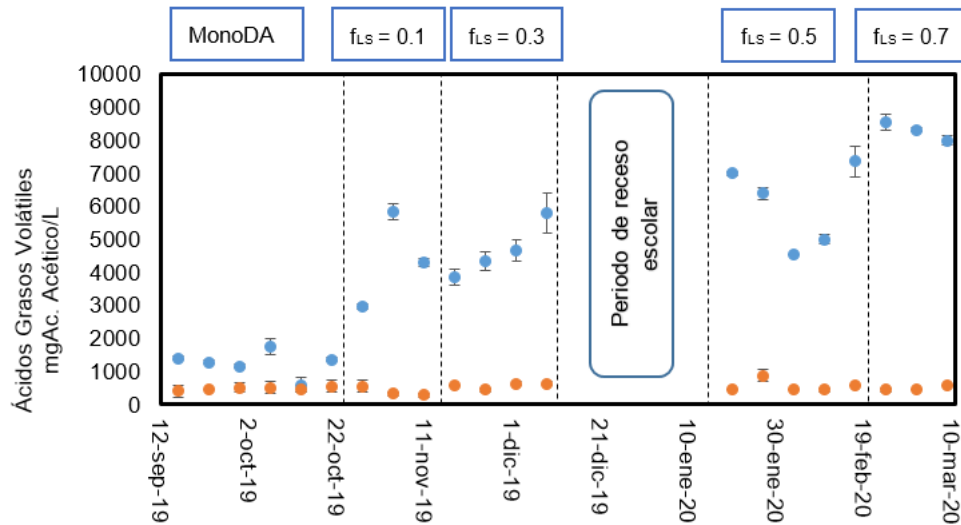
El desarrollo de este estudio se llevó a cabo a través de 2 fases (MonoDA y CoDA), esta última dividida en 5 periodos. Uno de estos periodos fue el receso escolar, en el que no se alimentó el BDG. La estabilidad del bioproceso se evaluó con base en la concentración de AGVt, la AT y el pH. Los AGVt indican si un proceso de digestión anaeróbica es saludable: los valores menores a 1,500 mg/L son apropiados para que un proceso con alimentación semi-continua sea estable y no presente riesgos de inhibición. En la Figura 5 se presentan los perfiles de concentración de AGVt en la entrada y salida del biodigestor. En la MonoDA los valores promedio de AGVt a la entrada fueron de  $1,260 \pm 381$  mg/L. En la salida de esta fase, la concentración fue de  $493 \pm 55$  mg/L, lo que indica que el proceso se llevó a cabo sin problemas. Estos valores de concentración de ácidos son comparables con otros procesos de MonoDA de EB a escala rural, donde se alcanzaron valores entre  $1,780 \pm 102$  y  $606 \pm 98$  mg/L para la entrada y la salida respectivamente (Angelidaki & Ellegaard, 2005). Como era de esperarse, para los periodos de la fase de CoDA se presentaron incrementos en la concentración de AGVt en la entrada de 71.2%, 73.0%, 79.2% y 84.8%, respectivamente, debido a la adición progresiva de LS.

Al referirse a la concentración de AGVt en la salida del digestor, es de resaltar que esta variable se mantuvo en un intervalo de concentraciones entre 280 y 880 mg Ac. Acético/L. Lo anterior evidencia que, aunque se incremente la concentración de AGVt en el alimento, alcanzando una  $f_{LS}$  de 0.7 (VCO de

0.73 kg SV/m<sup>3</sup>d) sin riesgo de inhibición, el sistema tiene una capacidad de biodegradar estos ácidos alcanzando reducciones de hasta el 94%.

**Figura 5**

*Perfil de ácidos grasos volátiles en el digestor.*



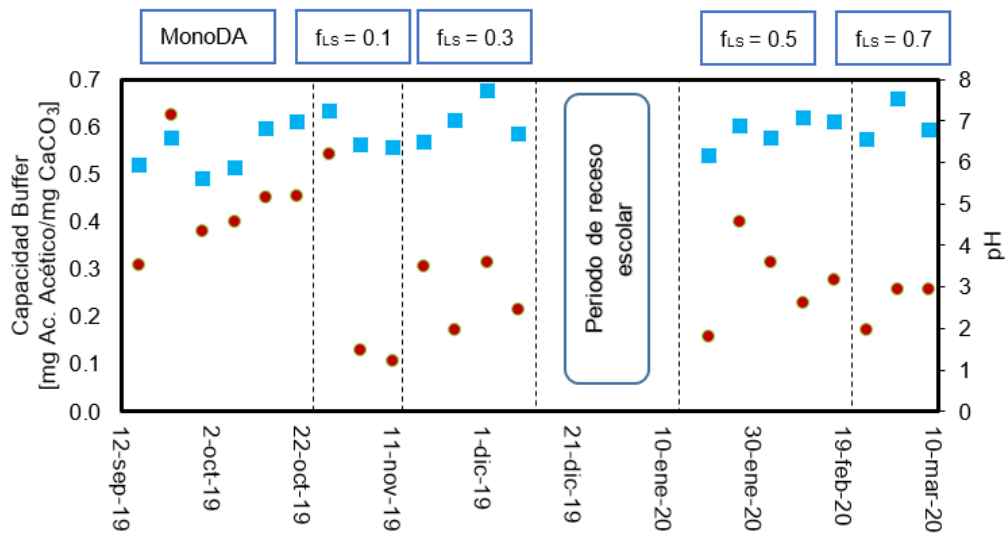
Entrada (color azul), salida (color naranja). Los resultados son expresados como un promedio con un intervalo de confianza del 95%. (n=3)

La capacidad Buffer (relación AGVt/AT) indica la cantidad de ácidos que el lodo efluente puede neutralizar sin cambiar su pH. Un biodigestor en correcto funcionamiento debe presentar en su efluente una capacidad buffer entre 0.3 y 0.4 mg Ac. Acético/mg CaCO<sub>3</sub> soportada en valores de pH dentro del rango 6.5-8 (Castro, et al., 2017). En la Figura 6 se muestra el comportamiento de la capacidad buffer para cada uno de las fases. Para la primera fase del presente estudio (monoDA de EB) la AT alcanzó  $1,172.2 \pm 289$  mg CaCO<sub>3</sub>/L, representando una capacidad buffer de  $0.44 \pm 0.11$  Ac. Acético/mg CaCO<sub>3</sub> (pH de  $6.6 \pm 0.1$ ). Lo anterior deja en evidencia la alta alcalinidad y excelente capacidad de amortiguamiento a los aumentos de acidez que soporta el EB como sustrato. Castro *et al.*, (2017)

reportaron valores de capacidad buffer de 0.52-0.94 mg A. Acético/mg CaCO<sub>3</sub> para la entrada y valores de 0.36 ± 0.07 mg Ac. Acético/mg CaCO<sub>3</sub> para la salida, trabajando con EB como sustrato, dicho BDG operó en perfecto estado sin riesgo de acidificación bajo condiciones mesofílicas (25 ± 5°C), presentando valores de AGVt y capacidad buffer similares a los del presente estudio, aunque este último se dio bajo condiciones psicrófilicas (17.3 ± 5°C).

**Figura 6**

*Perfiles de pH y Capacidad Buffer (AGV/AT) durante todo el proceso en la salida*



pH (color azul) y C. Buffer (AGV/AT) (color rojo). Los resultados son expresados como un promedio con un intervalo de confianza del 95%. (n=3)

En cuanto a la CoDA de LS con EB, la AT promedio para cada periodo de alimentación fue de 2,056, 2,383, 2,173 y 2,256 mg CaCO<sub>3</sub>/L respectivamente. Los resultados muestran que en ninguno de los periodos de alimentación con LS hubo riesgo de inhibición por acidificación, y que la mezcla de LS y EB no representa un riesgo de desequilibrio dentro del reactor. De lo anterior se puede entender que la

adición del nuevo sustrato mejoró la capacidad del consorcio microbiano de transformar la materia orgánica, permitiendo mantener valores de pH a la salida alrededor de  $6.7 \pm 0.3$  durante todo el proceso. Estos resultados indican que la VCO con la que se opera el digestor está en condiciones de funcionamiento apropiadas para la bioconversión anaerobia de la mezcla 70% LS y 30% EB. Escalante *et al.* (2017) obtuvieron valores de reducción de AGV cercanas al 80.23% para un proceso de CoDA de LS y EB (70:30 V/V). Los valores de capacidad buffer y pH estuvieron alrededor de los 0.2 y  $7.4 \pm 0.4$ . Es de mencionar que el estudio anteriormente citado operó en condiciones mesofílicas, lo cual refuerza la viabilidad y el buen funcionamiento del BDG instalado en el ITAC aún bajo condiciones psicrófilas ( $17.3 \pm 3.3^\circ\text{C}$ ).

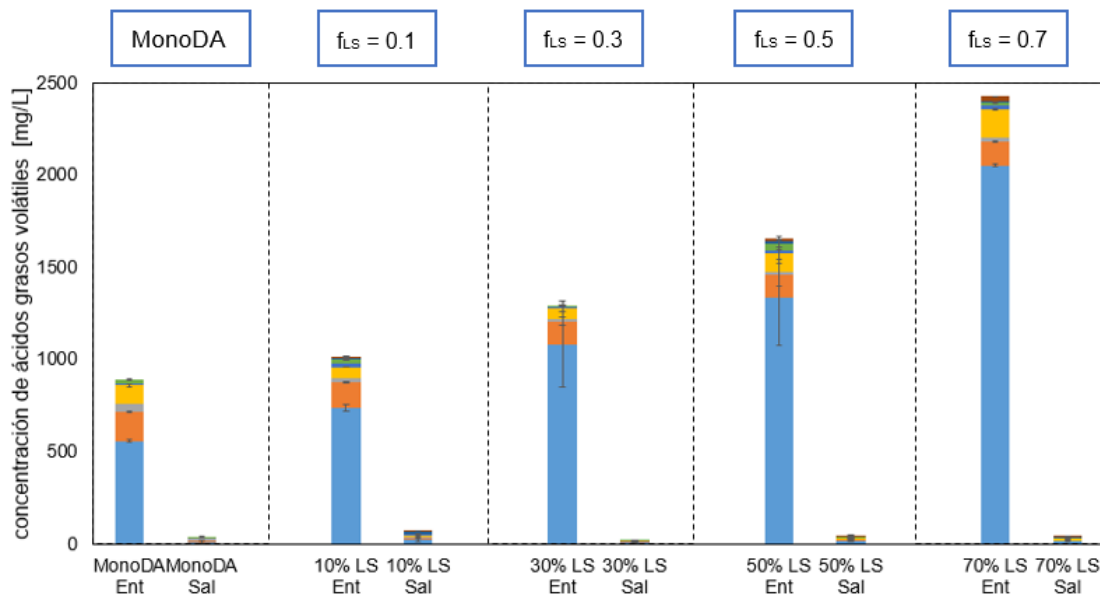
### **5.2.1. Bioquímica del proceso**

De acuerdo a las etapas metabólicas predominantes en la DA, el contenido de los AGV (ácidos acético, propiónico, isobutírico, butírico, isovalérico, valérico, isocaprónico y caprónico) es un indicador del buen funcionamiento del proceso. Los valores promedio en el contenido de AGV entre 1 y 6 carbonos para la entrada y salida de cada periodo de monitoreo son presentados en la Figura 7. Como se evidencia, el ácido con mayor presencia en el alimento tanto para la MonoDA como la CoDA es el ácido acético con promedios de  $562.5 \pm 7.7 \text{ mg/L}$  y  $1,305.7 \pm 555.5 \text{ mg/L}$  respectivamente. Lo anterior representa un alto contenido de materia orgánica de fácil degradación disponible. Los niveles de ácidos grasos son importantes en la digestión por dos razones: (a) los ácidos orgánicos de cadena corta son los precursores inmediatos en la cadena metabólica que conducen a la formación de metano, donde, particularmente el ácido acético es el antecesor de aproximadamente el 70% de todo el  $\text{CH}_4$  formado durante la digestión (Poh & Chong, 2009) y (b) una alta concentración de ácidos causa estrés en la población microbiana y, en última instancia, pueden conducir a la inhibición del proceso. Cuando se presenta una acumulación notoria de AGV ya sea por variaciones en la

temperatura o por el suministro de una carga orgánica inapropiada, hay afección directa en los microorganismos encargados de la metanogénesis, ocasionando un decaimiento en su actividad produciendo reducciones en la producción de metano y déficits en el consumo de materia orgánica. A pesar de la VCO alimentada para la CoDA ( $0.73 \text{ kg SV/m}^3_{\text{operación d}}$ ), la alta concentración de AGV contenida en la carga ( $2,428 \pm 45 \text{ mg/L}$ ), y teniendo en cuenta que las temperaturas óptimas para un proceso de DA son mesofílicas ( $37 \text{ }^\circ\text{C}$  en promedio) el BDG de este estudio no presenta inhibiciones de las actividades metabólicas a un promedio de temperatura ambiente de  $17.3 \text{ }^\circ\text{C}$ , pues los valores AGV de la salida se mantienen por debajo de  $800 \text{ mg/L}$ . Por otro lado, de acuerdo a la ruta metabólica generalizada del proceso de formación de metano (ver Apéndice E. Ruta metabólica generalizada de la Digestión Anaeróbica), la relación ácido propiónico/ácido acético es un indicador del buen funcionamiento del bioproceso.

**Figura 7**

*Concentraciones de AGV para MonoDA y CoDA en entrada (E) y salida (S)*

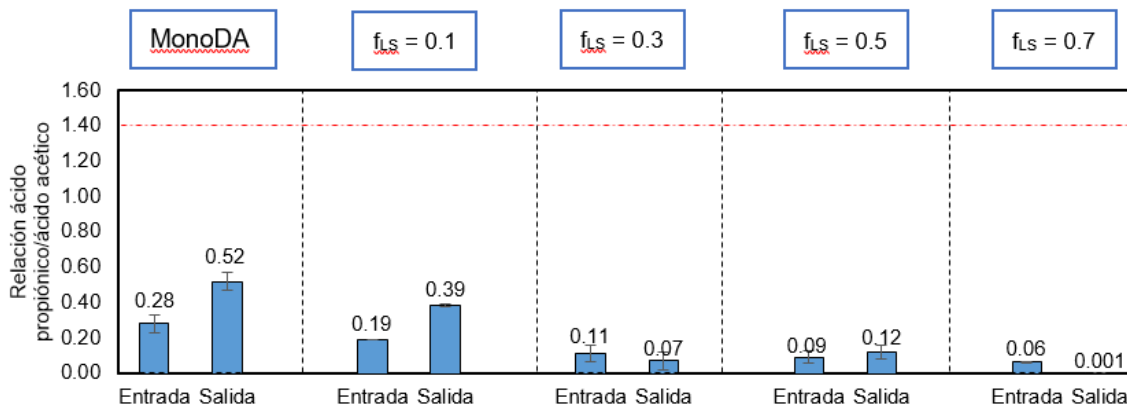


En la Figura 8 se presentan los valores de la relación ácido propiónico/ácido acético para el caso de estudio. Un aumento en la relación ácido propiónico/ácido acético pueden indicar la inhibición del

proceso: valores superiores a 1.4 indican una falla inminente del digestor. Lo anterior se puede ver sustentado en el hecho que, un aumento en el nivel de acetato indica un problema con la población metanogénica, representado en la ineficiencia para la conversión de acetato a CH<sub>4</sub>.

**Figura 8**

*Relación ácido propiónico/ácido acético para MonoDA y CoDA, en Entrada (E) y Salida (S)*



Para las fases y periodos estudiados, la relación P/A estuvo por debajo de 0.52, lo que indica que, durante todos los periodos de experimentación del presente estudio, los microorganismos estuvieron en la facultad de producir metano a partir del ácido acético disponible, sin ningún riesgo de inhibición por exceso de presencia del mismo durante el proceso de CoDA y MonoDA, demostrando que la población pudo conseguir la adaptación al consumo de materia orgánica con alto contenido de AGV.

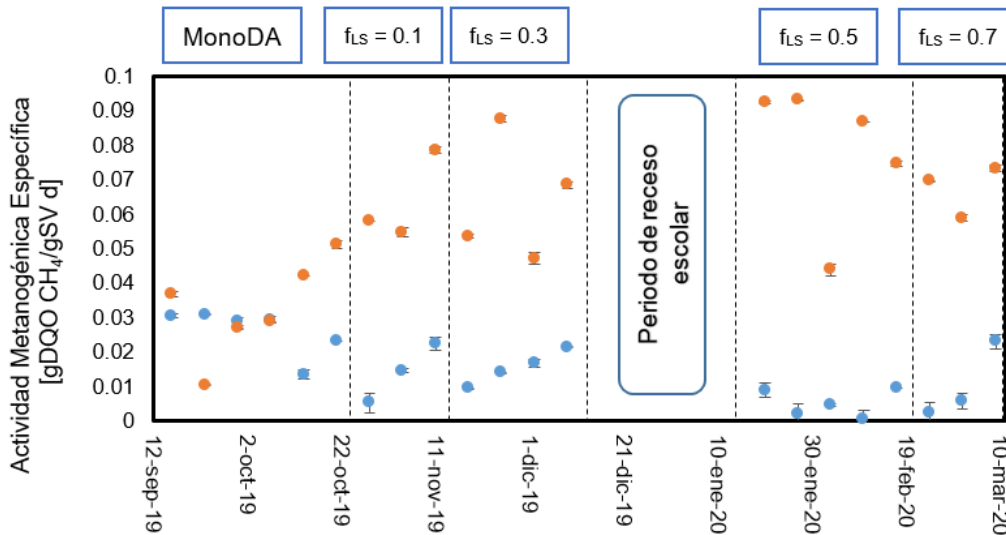
**5.2.2. Comportamiento microbiológico**

La AME es un indicador de la capacidad de la biomasa microbiana para transformar un sustrato específico como lo es el acetato en metano (Astals, et al., 2015). En la Figura 9 se muestra el comportamiento de la AME a la entrada y salida durante la operación en MonoDA y CoDA. Como puede verse, la AME de la mezcla alimentada decreció según aumentó la f<sub>LS</sub>, esto se explica debido al aumento en la concentración de

AGVt, mientras que la salida presentó el comportamiento contrario, lo cual evidencia la correcta adaptación de lo microbiota presente en el BDG frente al nuevo sustrato (LS).

**Figura 9**

*Comportamiento de la AME durante todo el proceso de MonoDA y CoDA*



AME en la entrada (color azul) y salida (color naranja). Los resultados son expresados como un promedio con un intervalo de confianza del 95%. (n=3)

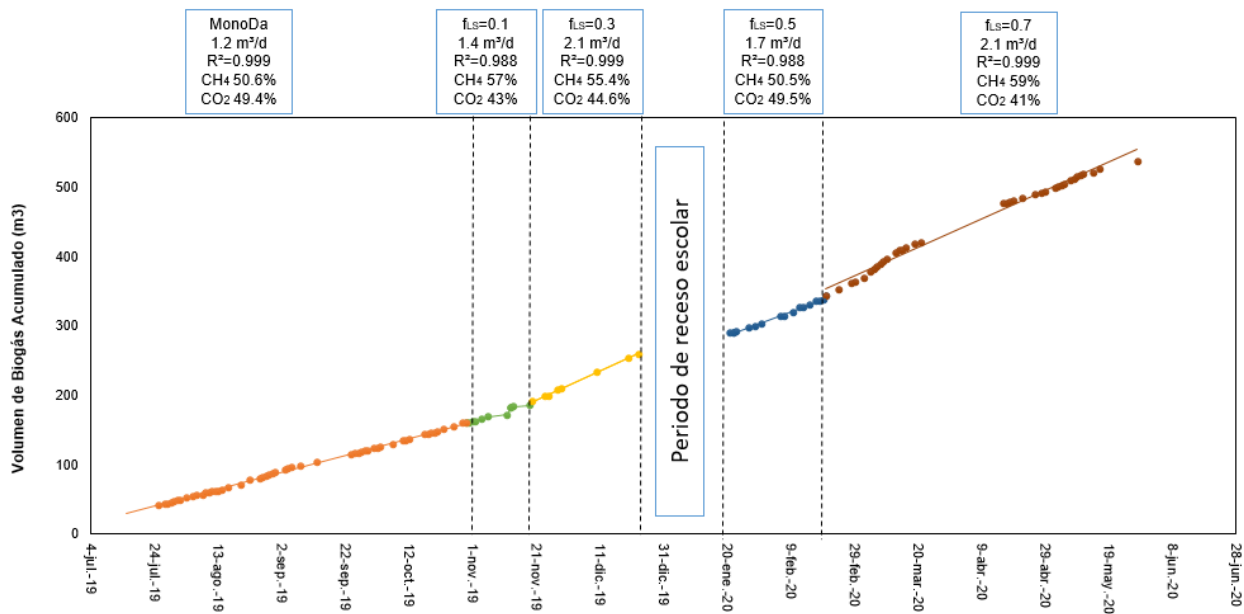
### 5.3. Rendimientos del proceso

Para evaluar la producción de biogás se determinó la velocidad de producción de biogás (VPB) y la producción específica de biogás (PEB). Para el primero, se tiene en cuenta la cantidad de biogás producida por unidad de materia orgánica alimentada (SV alimentados), sobre la unidad de volumen de operación. El segundo, se estima a partir del volumen de operación utilizado, es decir cuánto biogás se produjo por unidad de volumen de operación del digester. Para este fin se midió la producción de biogás a lo largo de la MonoDA y la CoDA. En la fase MonoDA la producción fue de 1.2 m<sup>3</sup>/d. Para los periodos  $f_{LS} = \{0.1; 0.3; 0.5; 0.7\}$  hubo un aumento respecto a la MonoDA de 14.3%, 42.9%, 29.4% y

42.9%, respectivamente, indicando que la adición de LS aumentó la producción diaria de biogás. En la Figura 10 se registra el comportamiento de la producción de biogás a lo largo del presente estudio. Cabe mencionar que la pendiente de cada periodo corresponde a la producción neta diaria de biogás.

**Figura 10**

*Producción de biogás diaria durante cada periodo*



Es importante señalar que, al aumentar la proporción de suero en el alimento, fue posible evidenciar mejoras en la calidad, alcanzando porcentajes de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> de 59 y 41% respectivamente. El poder calórico inferior de un biogás con 59% de metano es de 29,533 kJ/kg (Castro, et al., 2017) y dado que el precio de consumo de gas domiciliario para la región es de COP \$150,000 (100 lbm), una autogeneración de 2.1 m<sup>3</sup>/d de este biogás representa un ahorro de COP \$152,900 mensuales para el instituto. Respecto a su aprovechamiento en el ITAC, el biogás fue usado como combustible para cocción de alimentos en el restaurante escolar, para calentar agua en el proceso de esterilización del material de ordeño y para el sacrificio de pollos como práctica agropecuaria del colegio.

En la *Tabla 4* se muestran los rendimientos del proceso (PEB) y del reactor (VPB) de este trabajo, comparados con los propuestos por la empresa Sistema.bio para un BDG con las mismas características pero alimentado con EB y otro BDG que opera a 14-18 °C, y utiliza EB como sustrato (Martí-Herrero, et al., 2014).

**Tabla 4.**

*Rendimientos del proceso y del reactor para MonoDA, CoDA y otros estudios*

	Este estudio					Sistema 8 Biobolsa	Martí, et al., 2014
	MonoDA	CoDA					
		10% LS	30% LS	50% LS	70% LS		
<b>Temperatura [°C]</b>	17°C	17°C	17°C	17°C	17°C	15-23°C	14-18°C
<b>Sustrato</b>	EB	EB+LS	EB+LS	EB+LS	EB+LS	EB	EB
<b>Rend. Proceso</b> [Nm <sup>3</sup> biogás/kgSV d]	0.65	0.69	0.74	0.57	0.74	0.35	0.23
<b>Rend. Reactor</b> [Nm <sup>3</sup> biogás/m <sup>3</sup> operación d]	0.24	0.32	0.4	0.33	0.54	0.25	0.06

Como puede verse, los rendimientos encontrados en la fase MonoDA son consecuentes con los propuestos por Sistema.bio, mientras que en la fase CoDA estos valores superan incluso el rendimiento reportado por Martí *et al.* (2014) especialmente para el último periodo de alimentación con LS ( $f_{LS}=0.7$ ). Lo anterior evidencia que la CoDA de LS con EB puede mejorar 1.1 veces el rendimiento del bioproceso y 2.2 veces el rendimiento del reactor respecto de la MonoDA.

## 5.4. Calidad del digerido

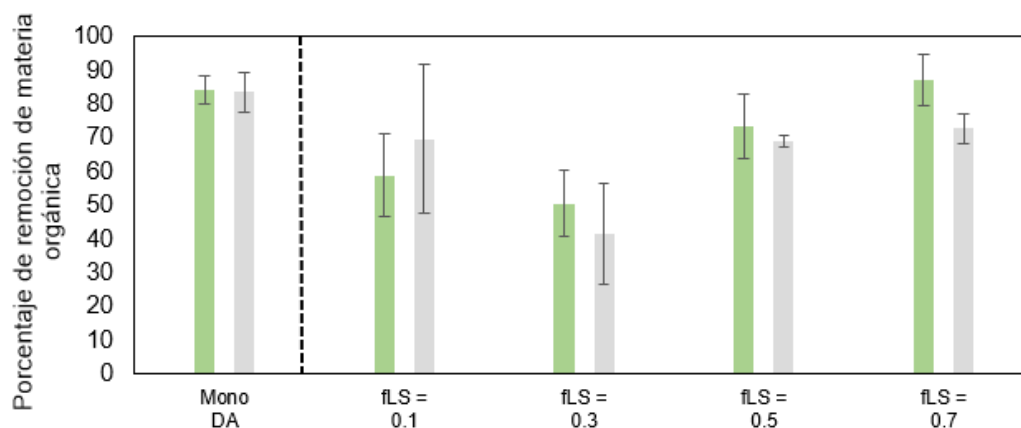
### 5.4.1. Remoción de materia orgánica: comportamiento de la DQO y los SV

El porcentaje de remoción de SV y DQO indica la cantidad de materia orgánica que se está consumiendo durante el proceso y la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia presente durante la DA, respectivamente. En la

**Figura 11**, se muestra el comportamiento de la remoción de SV y DQO para cada una de las fases y etapas estudiadas en este trabajo, indicando que en todas las etapas, la bioconversión redujo la materia orgánica incluso por debajo de valores permitidos para aguas residuales el cual, en términos de DQO, es de 200 mg/L (MINAMBIENTE, 2018). Los valores de materia orgánica alcanzados al final del proceso permiten el uso del digerido como biofertilizante de riego sin riesgo de acumulación de nutrientes en la superficie agrícola (MINAGRICULTURA, 2020)

#### Figura 11

Porcentaje de remoción de SV (color verde) y DQO (color gris).



Los resultados son expresados como un promedio con un intervalo de confianza del 95%.

(n=3)

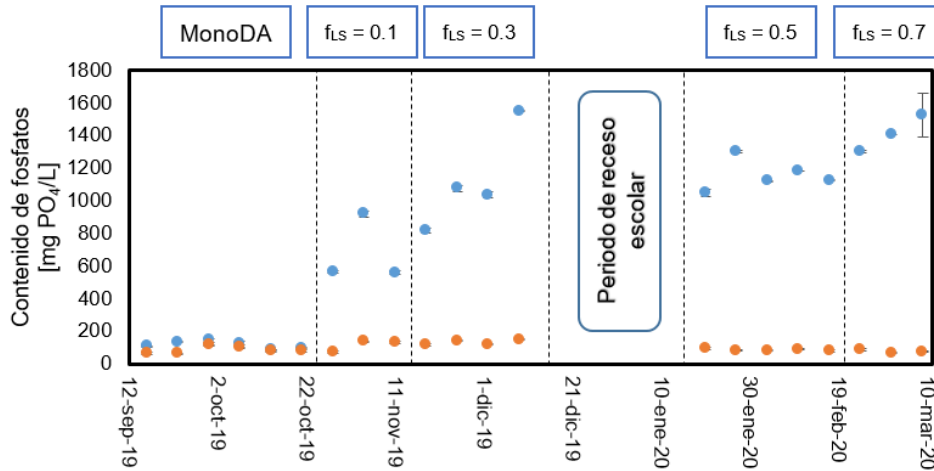
La remoción de SV y DQO se obtuvo a partir de la diferencia entre los SV y DQO cargados y los valores finales de estos. Durante la operación en CoDA se logró remover entre 1.1 y 1.5 veces más materia orgánica que en la MonoDA, indicando que la población microbiana pudo transformar satisfactoriamente la materia orgánica presente en las alimentaciones con LS. La CoDA permitió estabilizar 49 L de LS y 21 L de EB diariamente.

#### **5.4.2. Remoción de materia orgánica: Concentración de fosfatos**

Los fosfatos son un macronutriente necesario para el transporte de energía en el metabolismo celular. Aplicado correctamente en suelos promueve el crecimiento de cultivos y aumenta su producción. Debido al proceso anareobio, el digerido capta estos fitonutrientes por lo que puede ser usado como fertilizante y recuperador de suelos. Durante el presente estudio, la concentración de fosfatos en el alimento aumentó en función de la  $f_{LS}$ . En la fase de MonoDA se mantuvo un promedio de  $115 \pm 23$  mg  $PO_4^{3-}/L$  mientras que en CoDA el alimento tuvo 4.9, 8.7, 9.0 y 11.3 veces más fosfatos que la MonoDA para  $f_{LS} = \{0.1; 0.3; 0.5; 0.7\}$  respectivamente. Este registro se muestra en la Figura 12.

#### **Figura 12**

*Contenido de fosfatos en la entrada (color azul) y salida (color naranja) durante todo el proceso*



Los resultados son expresados como un promedio con un intervalo de confianza del 95%.

(n=3)

Respecto a la salida, es posible observar que su contenido fue aproximadamente constante ( $96 \pm 27 \text{ mg PO}_4^{3-}/\text{L}$ ), exhibiendo una acumulación progresiva de fosfato en la biomasa dentro del BDG. Kulakovskaya *et al.*, (2014) explican que dicha acumulación se da intracelularmente en forma de sales hidratadas de fosforo y magnesio de baja solubilidad, que tienen como fin la gestión energética y la regulación enzimática del inóculo. Entonces, se infiere que la adición de LS como co-sustrato afectó positivamente la calidad del digerido convirtiéndolo en un fertilizante orgánico de mayor contenido nutricional, pero de lenta liberación. Esta última característica evita problemas como la eutrofización de cuerpos de agua debido a la descarga masiva de fosfatos (Awual, 2019). Cabe resaltar que digeridos con concentraciones entre 387.5 y 417.5 mg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/L han sido reportados para procesos de CoDA de LS con EB (Escalante, et al., 2018), lo cual demuestra un alto grado de adaptación del inóculo del presente estudio, resultante en una alta captación de nutrientes en el digerido.

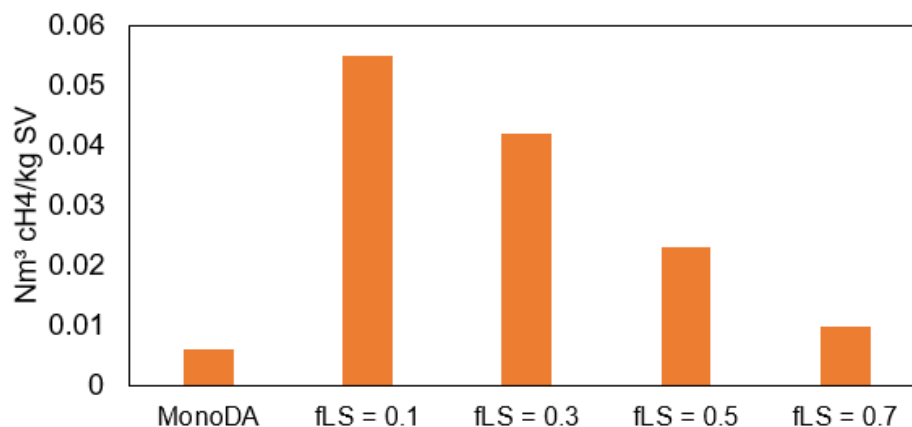
### 5.4.3. Potencial de Biometanización residual

El PBM residual indica la cantidad de metano producida por el digerido a la salida del BDG. Se recogieron las muestras de las dos fases y periodos de operación para llevar a cabo la prueba. En la se muestra el comportamiento del ensayo para la MonoDA y los 4 periodos de la CoDA.

Para la salida de la MonoDA se obtuvo un PBM residual de  $0.0015 \text{ Nm}^3/\text{kgSV}$ , el cual comparado con el estudio Rico *et al.*, (2015) ( $0.0060 \text{ Nm}^3/\text{kgSV}$ ) resulta ser un valor relativamente bajo, lo que indica que en el proceso de MonoDA del presente estudio, la materia orgánica fue satisfactoriamente consumida y trasformada. En el primer periodo de la segunda fase, el valor de PBM residual aumentó en un 89.1%, dando a entender la dificultad presentada por parte de la población microbiana para aprovechar la materia orgánica disponible dentro del BDG.

**Figura 13.**

*Potencial de Biometanización Residual*



En los siguientes periodos se observa una disminución del potencial con respecto a la carga de 10% LS, esto tal vez se deba a la capacidad de adaptación adquirida de los microorganismos para hacer uso de la materia orgánica proporcionada por la adición de LS.

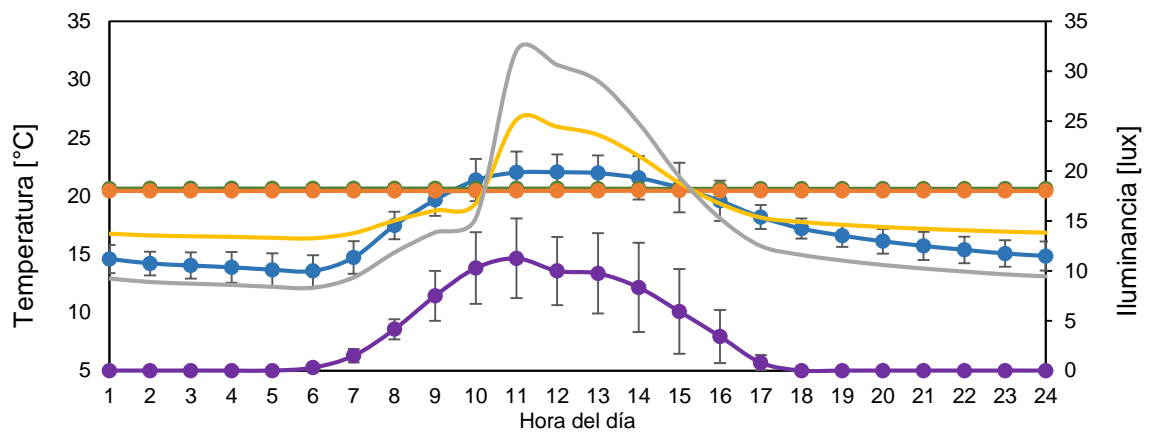
### 5.5. Comportamiento térmico del BDG

#### 5.5.1. Perfiles de temperatura promedio

Durante las 13 semanas de registro se observó que el comportamiento térmico del BDG se segregó en dos periodos: uno diurno y otro nocturno, como se ilustra en la Figura 14. Durante el día la radiación solar recibida por la geomembrana se transfirió al biogás y se expresó como un aumento en sus temperaturas, pero, como el BDG no fue aislado, el volumen de operación mantuvo una temperatura constante similar a la del suelo. Entre las 6 a.m. y 11 a.m. se dio un calentamiento sin recepción de radiación solar directa sobre la manga. A las 9 a.m. los perfiles de  $T_m$  y  $T_b$  se vieron amortiguados, este efecto fue producido por la entrada de la alimentación que consumió energía para igualar su temperatura con la del volumen de operación. Entre las 11 a.m. y las 5 p.m. se recibió radiación solar sobre la geomembrana. A partir del ocaso (6 p.m.), se dio un enfriamiento que cesó con la salida del sol. Como consecuencia a las 6 a.m. se registraron los valores mínimos de temperatura en todos los sistemas y el primero de iluminancia ambiental en el día.

**Figura 14**

*Perfiles promedio horarios registrados y estimados.*



Temperatura ambiente ( $T_{amb}$ , color azul), Temperatura lodo ( $T_{op}$ , color verde), Temperatura suelo ( $T_s$ , color naranja), Temperatura biogás ( $T_b$ , color amarillo), Temperatura manga ( $T_m$ , color gris),  
Iluminancia ambiental ( $I_{amb}$ , color violeta)

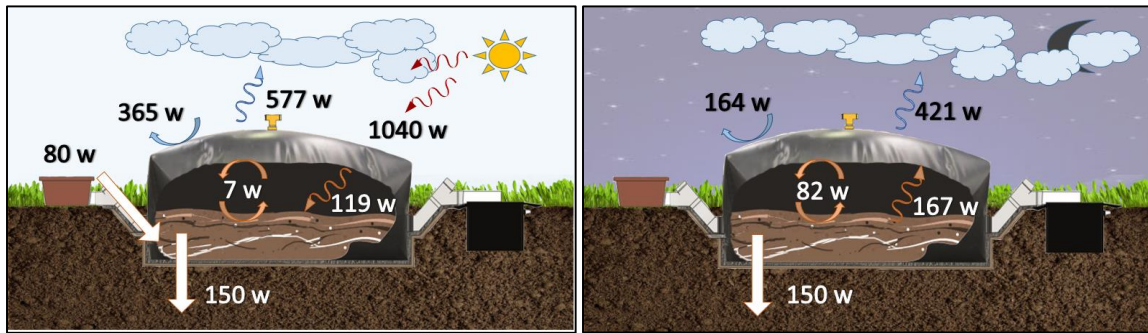
Como puede verse, la  $T_{amb}$  presentó una distribución tipo campana a lo largo del día, encontrándose una media de  $17.3 \pm 3.3^{\circ}\text{C}$ , máxima de  $25.8^{\circ}\text{C}$  y mínima de  $10^{\circ}\text{C}$ , mostrando que el BDG operó en condiciones ambientales en el orden psicrófilico. En cuanto a los sistemas lodo y suelo mantuvieron una temperatura constante de  $20.6 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$  y  $20.4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  respectivamente, sin presentar una diferencia significativa entre ambas medidas ( $p < 0.05$ ) con lo cual se confirma que el lodo entró en equilibrio térmico con el suelo. Valores cercanos han sido registrados en BDGs domésticos sometidos a condiciones ambientales del orden psicrófilico, encontrándose  $T_{amb}$  promedio entre  $16$  y  $17^{\circ}\text{C}$ ,  $T_l$  entre  $18$  y  $25^{\circ}\text{C}$  y  $T_s$  en el orden de  $16^{\circ}\text{C}$  (Perrigault, et al., 2012). Para la manga y el biogás se estimaron temperaturas medias de  $18.9 \pm 3.2^{\circ}\text{C}$  y  $17.1 \pm 6.4^{\circ}\text{C}$ , máximos de  $26.6^{\circ}\text{C}$  y  $32.5^{\circ}\text{C}$ , y mínimos de  $16.4^{\circ}\text{C}$  y  $12.1^{\circ}\text{C}$  respectivamente, con comportamientos similares al del ambiente, pero marcados por las horas de sombra sobre el BDG. En el presente estudio se encontró una diferencia de  $10.2^{\circ}\text{C}$  entre las temperaturas mínima y máxima alcanzadas por el biogás mientras que Puentes y Gómez (2019) en un BDG doméstico aislado con el aire ambiental (uso de invernadero), pero no con el suelo, encontraron una diferencia de  $5^{\circ}\text{C}$  en la  $T_b$ , además, un aumento de  $1.5^{\circ}\text{C}$  en la  $T_l$  respecto de la  $T_s$ . Lo anterior demuestra que el invernadero cumple dos funciones: a) dar protección física al BDG y b) estabilizar la temperatura del biogás, pero no tiene un efecto práctico sobre la temperatura del volumen de operación. Además, estas dos funciones no suelen ser imperativas para el funcionamiento del BDG. En cuanto al tiempo climático, a lo largo del día se presentó un comportamiento ondular en la iluminancia ambiental, con una máxima registrada de  $20.7$  lux y una media de  $6.1 \pm 4.9$  lux, de manera que el factor de luminosidad promedio fue de  $0.3 \pm 0.2$ . Lo anterior es consecuente con un comportamiento nuboso en los cielos cachirenses.

### 3.5.2. *Transferencia de calor entre los sistemas implicados*

En la Figura 15 se muestran los promedios de los calores transferidos en el día y en la noche.

#### **Figura 15.**

*Transferencia de calor promedio en el día (figura a) y en la noche (figura b)*



Desde las 11 a.m. hasta las 5 p.m. (figura a) la manga recibió un promedio de  $1040 \pm 791$  w en forma de radiación solar directa. Esta energía aumentó la  $T_m$ , promoviendo la transferencia por mecanismo radiativo hacia el ambiente (cielo) y hacia el lodo. Como resultado, durante el periodo diurno la manga disipó  $577 \pm 159$  w hacia el cielo y  $119 \pm 18$  w hacia el lodo, mientras que en el periodo complementario del día (6p.m. – 10 a.m., figura b) se transfirieron  $413 \pm 27$  w hacia el cielo, pero recibió  $167 \pm 40$  w del lodo, debido a que la  $T_m$  fue menor a la  $T_l$ . De manera similar, durante el día se transfirieron  $365 \pm 424$  w por mecanismo convectivo desde el aire ambiental hacia la geomembrana, mientras que, en la noche el intercambio de calor se dio en sentido contrario a razón de  $164 \pm 42$  w. Aunque en el periodo diurno el potencial de transferencia de calor promovió el intercambio desde la manga hacia el lodo, la naturaleza del mecanismo convectivo no permite la transferencia en el sentido de la gravedad, por lo que el lodo entregó a la manga en promedio  $7 \pm 21$  w durante el día y  $82 \pm 28$  w durante la noche. Además, se observó un intercambio de calor aproximadamente constante entre el volumen de operación y el suelo de  $150 \pm 8$  w. Weatherford *et al.* (2015) reportan transferencias similares al comportamiento descrito, con un 29% más de radiación solar directa recibida en todas las superficies

y el doble de energía cedida al suelo. Por su parte Perrigault (2009) registró pérdidas con el ambiente del orden de 960 w por convección, pero sin pérdidas apreciables por conducción debido al aislamiento usado.

De manera general, se encontró que la nula transmisividad de la geomembrana no permitió la llegada de la radiación solar al lodo y, debido a la baja eficiencia que ofrece la transferencia de calor por mecanismo convectivo en el biogás, la energía recibida por la manga se descargó en el ambiente. Como consecuencia de lo anterior, el lodo en el volumen de operación entró en equilibrio térmico con el suelo. Por lo tanto, se hace evidente que el aislamiento térmico del BDG con el suelo tiene un mayor efecto sobre la temperatura del lodo que su aislamiento con el aire ambiental, además se confirmó que el uso de materiales con mayor transmisividad para la elaboración del BDG promueve un mayor efecto de la radiación solar directa en la temperatura del lodo, por lo tanto se concluye que, a la hora de instalar sistemas anaerobios es mejor dirigir los recursos hacia el material del BDG y el aislamiento en la zanja, que instalar un invernadero.

#### 4. Conclusiones

- Se instaló un BDG Sistema.bio® de 5.2 m<sup>3</sup> de operación (sistema 8) con un periodo de adaptación de 3 meses, usando como sustrato estiércol bovino y agua en relación 1:3, alcanzando una AME de 0.058 gDQO CH<sub>4</sub>/gSV la cual es favorable para iniciar un proceso de codigestión anaeróbica con alimentación semicontinua.
- La variación de las concentraciones de los diferentes AGV dentro del proceso de MonoDA y CoDA está estrechamente relacionada con la estabilidad y el rendimiento del BDG. A lo largo del proceso se alcanzaron concentraciones finales de AGV alrededor de los 44.9 mg/L con una relación de Ac propiónico/Ac Acético de 0.001, lo cual significa que el proceso de codigestión de la mezcla LS:EB 70:30 a una temperatura media de 17°C es estable y no presenta riesgos de inhibición, obteniéndose, de esta manera un rendimiento del proceso de 0.74 Nm<sup>3</sup>/ Kg SVy del digestor de 0.54 Nm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup><sub>operacion</sub>d, indicando que se logró una producción de biogás de 2.05 Nm<sup>3</sup>/d con un porcentaje de CH<sub>4</sub> de 59%.
- Respecto al comportamiento térmico del digestor, se encontró una variación ondular en la  $T_{amb}$  ( $17.3 \pm 3.3^\circ\text{C}$ ), la  $T_m$  ( $17.1 \pm 6.4^\circ\text{C}$ ) y la  $T_b$  ( $18.9 \pm 3.2^\circ\text{C}$ ), mientras que la  $T_l$  ( $20.6 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ) y la  $T_s$  ( $20.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ) fueron constantes, lo que indica que los sistemas manga y biogás ofrecieron resistencia al intercambio de calor entre el lodo y el ambiente y que el suelo sirvió como sumidero de calor para el lodo (150 w), esto demuestra que el aislamiento con el suelo tiene un mayor efecto sobre la  $T_l$  que el aislamiento con el aire ambiental (uso de invernadero), y que es necesario usar materiales con alta transmisividad para la elaboración del BDG. El diseño del sistema de biodigestión junto con las factores ambientales de Cáchira permitieron un aumento en la  $T_l$  de  $3.3^\circ\text{C}$  sobre la  $T_{amb}$ .

### Referencias Bibliográficas

- Angelidaki, I. & Ellegaard, L., 2005. Effect of operating conditions and reactor configuration on efficiency of full-scale biogas plants. *Water Science & Technology*, Volumen 52, pp. 189-194.
- APHA, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21 ed. Washington, D.C.: A. P. Association.
- Astals, S., Batstone, D., Tait, S. & Jesen, P., 2015. Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Research*, Volumen 81, pp. 208-2015.
- Awual, M. R., 2019. Efficient phosphate removal from water for controlling eutrophication using novel composite adsorbent. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 228, pp. 1311-1319.
- Benavides, H., Simbaqueva, O. & Zapata, H., 2017. *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*. Bogotá: Imprenta Nacional Colombiana.
- Buysman, E., 2009. *Anaerobic Digestion for Developing Countries with Cold Climates*. Faculty of Environmental Sciences, University of Wageningen. Wageningen, Países Bajos.
- Carrillo, D. A. & Portillo, A. S., 2018. *Aprovechamiento del Lactosuero a partir del proceso de digestión anaeróbica: Estudio de la estabilidad y de la recuperación de nutrientes en forma de Estruvita en digestores tubulares*. Bucaramanga: Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Químico.
- 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., Mantilla, L., 2017. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, Volumen 239, pp. 311-317.
- Escalante, H., Castro, L., Besson, V. & Jaimes-Estévez, J., 2017. Feasibility of the anaerobic process of Cheese Whey in a plug flow reactor (PFR). *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, VWIII(3. In press).
- Escalante, H., Castro, L., Gauthier-Maradei, P. & Rodríguez de la Vega, R., 2016. Spatial decision support system to evaluate crop residue energy potencial by anaerobic digestion. *Bioresource Tchnology*, pp. 219, 80-90.
- Escalante, H., Castro, L., Amaya, M., Jaimes, L., y Jaimes-Estévez, J., 2018. Anaerobic digestión of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. *Waste Management*, pp. 71, 711-718.
- Ferrer Martí, I., Garfi, M., Uggetti, E., Ferrer Martí, L., Calderón, A., & Velo García, E., 2011. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy*, Volumen 35(5), pp. 1668-1674.
- Ferrer-Martí, L., Ferrer, I., Sánchez, E. & Garfí, M., 2018. A multi-criteria decision support tool for the assesment of household biogas digester predrammes in rural areas. A case of study in Perú. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 95, pp. 74-83.
- Jaimes-Estévez, J., Castro, L. & Escalante, H., 2018. Temperature effects on synergy in anaerobic co-digestion: cheese whey as study case. *Latin American Symposium on Anaerobic Digestion (DAAL) Thirteenth Edition*, Simposio llevado a cabo el mes de octubre en Medellín, Colombia.

- Jobling, B., Thai, S., Fritz, T., Esteves, S., Dinsdale, R., y Guwy, A., 2014. An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*, pp. 162-170.
- Kulakovskaya, T., Lichko, L. & Ryazanova, L., 2014. Diversity of Phosphorus Reserves in Microorganisms. *Uspenki Biologicheskoi Khimii*, Volumen 54, pp. 385-412.
- Martí Herrero, J., 2008. *Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación*. Bolivia: Cooperación Técnica Alemana-GTZ.
- Martí-Herrero, J. y otros, 2014. Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresource Technology*, pp. 87-93.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M., y Astals, S., 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 412-427.
- MEN, 2019. *Ministerio de Educación Nacional*. [En línea] Available at: <https://www.mineducacion.gov.co/>
- MINAGRICULTURA, 2020. *Reglamento para la producción primaria, procesamiento, empacado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación, comercialización de Productos Agropecuarios Ecológicos*. [En línea].
- MINAMBIENTE, 2018. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. [En línea] Available at: <https://www.minambiente.gov.co/>
- Perrigault, T., 2009. *Mejoramiento del comportamiento térmico de un biodigestor low-cost tipo plug-flow*. Trabajo Msc. final de carrera. Universitat Politècnica de Catalunya. España.

- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J. & Poggio, D., 2012. Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, pp. 259-268.
- Poh, P. & Chong, M., 2009. Development of anaerobic digestion methods for palm oil. *Bioresource Technology*, pp. 100,1-9.
- Puentes, J. & Gómez, C., 2019. *Digestión anaerobia de estiércol porcino en un reactor tubular bajo condiciones psicrófilas a escala real. (Tesis de pregrado en ingeniería Química)*. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga.
- Raposo, F., Borja, R., Cacho, J., Mumme, J., Oropold, K., Esteves, S., Noguero-Arias, J., Picard, S., Nielfa, A., Scherer, P., Wierinck, I., Aymerich, E., Cavinato, C., Rodriguez, D., García-Mancha, N., Lens, P., Fernández-Cegri, V., 2013. First international comparative study of volatile fatty acids in aqueous samples by chromatographic techniques: Evaluating sources of error. *TrAc Trends in Analytical Chemistry*, pp. 127-143.
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J. & Rico, J., 2015. High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrates ratio and organic loading rate. *Chemical Engineering Journal*, Volumen 262, pp. 784-802.
- Shah, F; Mahmood, Q., Pervez, A., Raja, I., y Shah, M., 2015. Co-digestión, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 62-642.
- Sistema.Bio, 2020. *Sistema.Bio: No hay residuos, solo recursos*. [En línea] Available at: <https://sistema.bio/> [Último acceso: 2019].

Viquez, J., 2012. Conversión de suero lácteo a biogás. *Revista UTN informa al sector agropecuario*, Volumen 60, pp. 41-45.

Waetherford, V. & Zhinqiang, Z., 2015. *Affordable solar-assisted biogas digesters for cold climates: Experiment, model, verification and analysis. (Tesis de maestría)*. University of Colorado: EEUU.

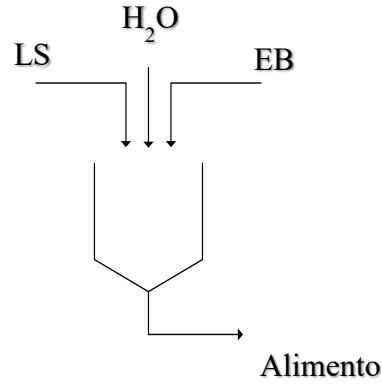
## Apéndices

### Apéndice A. Balance de masa en el tanque de mezcla

#### CONVENCIONES

$[SV]_i$	Cantidad de masa de SV por unidad de volumen del componente i	$\left[\frac{kgSV}{m^3}\right]$
$\dot{V}_i$	Caudal del componente i	$\left[\frac{m^3}{d}\right]$
$V_{op}$	Volumen de operación	$[m^3]$
$f_i$	Fracción volumétrica del componente i en el alimento	$[-]$
VCO	Velocidad de carga orgánica	$\left[\frac{kgSV}{m^3_{op} * d}\right]$
TRH	Tiempo de retención hidráulico del BDG	$[d]$

Teniendo en cuenta que en el tanque de mezcla no hay acumulación y no ocurre una biorreacción apreciable es posible asumir que la cantidad de materia orgánica disponible en la mezcla que corresponde al alimento del BDG, es igual a la suma de los aportes individuales de cada uno de los sustratos. La Figura 16. Diagrama del proceso de mezclado representa el proceso de mezclado del alimento, aplicando un balance de masa a la especie SV puede verse que:



**Figura 16.** Diagrama del proceso de mezclado

$$[SV]_{Entrada} = [SV]_{salida} \quad (\text{Ec. 21})$$

$$\sum \dot{V}_i [SV]_i = \dot{V}_{alimento} [SV]_{alimento} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$\dot{V}_{alimento} [SV]_{alimento} = VCO * V_{op} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$\sum \dot{V}_i [SV]_i = VCO * V_{op} \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{LS} * \frac{f_i}{f_{LS}} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$\frac{\dot{V}_{LS}}{f_{LS}} * \sum f_i [SV]_i = VCO * V_{op} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\dot{V}_{LS} = VCO * V_{op} * \frac{f_{LS}}{\sum f_i [SV]_i} \quad (\text{Ec. 27})$$

$$\dot{V}_i = \frac{VCO * V_{op}}{\sum f_i [SV]_i} * f_i \quad (\text{Ec. 28})$$

$$\frac{\sum \dot{V}_i [SV]_i}{\dot{V}_{alimento}} = \frac{VCO * V_{op}}{\dot{V}_{alimento}} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$\sum f_i[SV]_i = VCO * TRH \quad (\text{Ec. 30})$$

La (Ec. 28) predice el caudal a partir de una muestra de cada sustrato y de los parámetros  $V_{op}$ , VCO y fracción de LS y EB establecidos. A su vez, la (Ec. 30) permite observar la influencia de la variación de la  $f_{LS}$  sobre la VCO. Con el fin de gestionar los datos necesarios se tomó una muestra diaria de los sustratos durante una semana, los datos recolectados reposan en la Tabla 5. Finalmente se estimó el caudal requerido por cada componente para  $f_{LS} = \{0.1; 0.3; 0.5; 0.7\}$ , con  $f_{EB} = 0.3$  constante, como se puede ver en la Tabla 6.

**Tabla 5**

*Resultados muestreo semanal sustratos, parámetros y dimensiones del biodigestor*

Día	Sustrato		Parámetro	Valor
	EB [gSV/L]	LS [gSV/L]		
Lunes	181.4	46.2	f <sub>EB</sub> [-]	0.3
Martes	124.9	54.6		
Miércoles	108.4	67.2	TRH [d]	75
Jueves	116.5	65.6		
Viernes	135.5	49.9	Volumen total [m <sup>3</sup> ]	8
Sábado	102.5	43.8		
Domingo	105.3	66.3		
<b>Promedio</b>	<b>124.9</b>	<b>56.2</b>	V <sub>op</sub> [m <sup>3</sup> ]	5.2
<b>Desviación Estándar</b>	<b>27.5</b>	<b>10.1</b>		

**Tabla 6**

*Caudal alimentado de cada componente para cada fase*

Fracción LS		0.1	0.3	0.5	0.7
	LS	0.007	0.021	0.035	0.049
Volumen [m <sup>3</sup> ]	EB	0.021	0.021	0.021	0.021
	Agua	0.042	0.028	0.014	0
	Alimento	0.069	0.069	0.069	0.069

## Apéndice B. Balance de Energía

### Depuración de datos de temperatura

Durante el periodo de monitoreo se registraron 2160 datos en cada uno de los sensores. Para generar el perfil de temperatura se tomaron todos los registros de una misma hora y se promediaron, obteniendo un dato representativo del comportamiento a esa hora. Los resultados de este procedimiento se encuentran en la Tabla 7. De manera similar se realizó un promedio horario de la iluminancia ambiental con el fin de estimar la  $S_m$ . Este resultado se encuentra en la Tabla 8 El tratamiento computacional se llevó a cabo usando programación en Visual Basic a través del software Microsoft Excel®, las líneas de código se muestran a continuación:

#### ***Sub Horario()***

*Dim a, n, sum As Double*

*Dim i, j, k, NumDat As Integer*

*For j = 0 To 2*

#### ***'CONTEO DE DATOS***

*NumDat = 0*

*For i = 1 To 1048560*

*Dat = Trim(ActiveSheet.Range("C4").Offset(i, j).Value)*

*If Dat <> "" Then*

*NumDat = NumDat + 1*

*End If*

*Next i*

#### ***'PROMEDIO***

*For i = 1 To 24*

*a = 0*

*n = 0*

*For k = 1 To NumDat*

*If ActiveSheet.Range("B4").Offset(k, 0).Value = i Then*

*a = a + ActiveSheet.Range("C4").Offset(k, j).Value*

*n = n + 1*

```

    End If
  Next k
  ActiveSheet.Range("O4").Offset(i, 2 * j).Value = a / n
Next i

'ESTIMACIÓN DE LA DEVIACIÓN ESTANDAR
For i = 1 To 24
  sum = 0
  n = 0
  For k = 1 To NumDat
    If ActiveSheet.Range("B4").Offset(k, 0).Value = i Then
      sum = sum + ((ActiveSheet.Range("C4").Offset(k, j).Value -
      ActiveSheet.Range("O4").Offset(i, 2 * j).Value) ^ 2)
      n = n + 1
    End If
  Next k
  ActiveSheet.Range("P4").Offset(i, 2 * j).Value = (sum / (n - 1)) ^ (1 / 2)
Next i
Next j
End Sub

```

Cabe resaltar que el programa descrito solo funciona para una hoja de cálculo con datos de hora, Tamb, T<sub>1</sub> y T<sub>s</sub> ubicados como listados iniciando en las celdas "B5", "C5", "D5" y "E5" respectivamente.

### Asunciones y suposiciones

Para hallar el comportamiento térmico del digester fue necesario dar solución a su balance de energía pues permitió estimar el perfil promedio diario de temperatura de los sistemas biogás y manga plástica. Para este fin se tomaron las siguientes asunciones:

1. Cada sistema se representa mediante una sola temperatura.
2. Las capacidades caloríficas de la manga y del biogás son despreciables.
3. El volumen del biogás es constante y se aproxima como un prisma rectangular que llena toda la manga.

4. La radiación infrarroja no es absorbida por los gases.
5. Las pérdidas de calor por evaporación dentro del digestor y flujo de gas hacia el exterior son despreciables.
6. La estratificación a lo largo de la profundidad del lodo y la columna de biogás es despreciable.
7. La generación de calor por la reacción microbiana es despreciable.
8. Las propiedades del alimento son iguales a las del lodo a excepción de su temperatura, la cual es igual a la temperatura ambiente.
9. Las propiedades del suelo son independientes de la profundidad.
10. La temperatura del suelo no es afectada por la temperatura del digestor.
11. El cielo se comporta como un cuerpo negro a una temperatura ( $T_c$ ) de:

(Ec.

$$T_c = 0.0552T_{amb}^{1.5} \quad 31)$$

12. La convención  $S_m$  indica la radiación solar que recibe el sistema manga.
13. La convención  $Q_{x,i-j}$  indica la transferencia de calor por mecanismo x (r: radiativo, c: convectivo, cd: conductivo), siendo positivo si fluye del sistema i al sistema j.

Ahora bien, las propiedades térmicas del lodo, geomembrana, aire y biogás fueron tomadas de (Perrigault, 2009). Estos y otros parámetros tales como dimensiones y constantes reposan en la Tabla 9.

### **Algoritmo de solución**

Finalmente se aplicó el siguiente algoritmo para dar solución al balance de energía:

1. Se establecieron los parámetros, dimensiones y constantes

2. Para cada hora del día se definió la función objetivo como:

(Ec.

$$f(T_m) = [S_m] - [Q_{r,m-c} + Q_{c,m-v} + Q_{c,m-l} + Q_{r,m-l}] \quad (32)$$

3. Se definió un valor semilla de  $T_m^i = 298 K$

4. Se iteró estimando  $T_m^{i+1}$  como:

(Ec.

$$T_m^{i+1} = T_m^i - \frac{f(T_m^i)}{f'(T_m^i)} \quad (33)$$

5. Se definió el criterio de paro como:

(Ec.

$$|T_m^{i+1} - T_m^i| < 10^{-3} \quad (34)$$

Para ejecutar este procedimiento se utilizó el software TI-Nspire™ CX CAS Student, usando un lenguaje de programación TI-Basic, los resultados se encuentran en la Tabla 10. Las líneas de código se muestran a continuación:

**Prgm**

```
DelVar tamb,tgh,tghk,tgr,ts,tsky,ilum,inub
DelVar i,k,error,m,m2
DelVar f,g,ra,rs,hc
DelVar sgh,qsg,qs,qs,gcghs,qghsky,qghwind,qrg
```

**©Datos Sensados**

```
[[14.589,20.642,20.447,0,0]][14.2,20.647,20.443,0,0]][14.019,20.645,20.443,0,0]][13.864,20.653,20.44,0,0]][13.66,20.649,20.442,0,0]][13.551,20.649,20.442,0.3,0]][14.715,20.654,20.443,1.5,0]][17.471,20.645,20.444,4.1,0]][19.668,20.647,20.439,7.5,0]][21.376,20.642,20.438,10.3,0]][22.028,20.647,20.445,11.2,3648.][22.054,20.648,20.449,10.,3708.5]][21.975,20.643,20.449,9.7,3412.][21.559,20.633,20.452,8.3,2812.5]][20.723,20.627,20.452,5.9,2016.4]][19.583,20.63,20.447,3.4,1157.8]][18.191,20.63,20.446,0.8,367.8]][17.207,20.629,20.447,0,0]][16.595,20.629,20.445,0,0]][16.108,20.629,20.445,0,0]][15.707,20
```

.628,20.444,0,0][15.373,20.63,20.442,0,0][15.058,20.631,20.443,0,0][14.84,20.629,20.438,0,0]]→m

```
m2:=newMat(25,14)
m2[1,1]:="Hora"
m2[1,2]:="Tamb"
m2[1,3]:="Tgh"
m2[1,4]:="Tg"
m2[1,5]:="Ts"
m2[1,6]:="Tgr"
m2[1,7]:="Flum"
m2[1,8]:="Sgh"
m2[1,9]:="Qghsky"
m2[1,10]:="Qghwind"
m2[1,11]:="Qrghs"
m2[1,12]:="Qcghs"
m2[1,13]:="Qsgr"
m2[1,14]:="Qsin"
```

For i,1,24,1

```
m[i,1]+273.15→tamb
m[i,2]+273.15→ts
m[i,3]+273.15→tgr
m[i,4]→ilum
m[i,5]→rs
m2[i+1,1]:=i
m2[i+1,2]:=tamb-273.15
m2[i+1,5]:=ts-273.15
m2[i+1,6]:=tgr-273.15
```

© **Ecuaciones**

```
(m[i,4])/(20.6668)→flum
rs*flum→sgh
((0.19)/(0.002))*20.36*(ts-tgr)→qsgr
7.75283914*10.84*(t-tamb)→qghwind(t)
0.0552*tamb^(1.5)→tsky
5.67*10(-8)*0.8*6.6*(t(4)-tsky(4))→qghsky(t)
5.67*10(-8)*((6.6)/(1.5))*(t(4)-ts(4))→qrghs(t)
```

If ts<tamb Then

```
((25.546*10(-3))/(0.26))→hc(t)
```

Else

```
9.8*(((0.26)(3))/(16.628*10(-6)*11.93*10(-6)))*2*((abs(t-ts))/(t+ts))→ra(t)
```

```
0.069*(ra(t))(1/3)*(0.763858)(0.074)*((25.546*10(-3))/(0.26))→hc(t)
```

EndIf

$hc(t)*6.6*(t-ts) \rightarrow qcghs(t)$

*If*  $i=9$  *Then*  
 $70*((4180)/(3600))*(ts-tamb) \rightarrow qsin$   
*Else*  
 $0 \rightarrow qsin$   
*EndIf*

$sgh-(qghsky(t)+qghwind(t)+qcghs(t)+qrghs(t)) \rightarrow f(t)$   
 $derivate(f(t),t) \rightarrow g(t)$   
 $298 \rightarrow tghk$   
 $10 \rightarrow error$

***While***  $error > 10^{-3}$   
 $tghk - ((f(tghk))/(g(tghk))) \rightarrow tgh$   
 $abs(tghk-tgh) \rightarrow error$   
 $tgh \rightarrow tghk$   
***EndWhile***

**Tabla 7***Perfil promedio diario de temperatura ambiente, lodo y suelo*

<b>Hora de día</b>	<b>T<sub>amb</sub> [°C]</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>T<sub>L</sub> [°C]</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>T<sub>s</sub> [°C]</b>	<b>Desviación Estándar</b>
1	14.6	1.2	20.6	0.3	20.4	0.2
2	14.2	1.0	20.6	0.3	20.4	0.2
3	14.0	1.1	20.6	0.3	20.4	0.2
4	13.9	1.3	20.7	0.3	20.4	0.2
5	13.7	1.4	20.6	0.3	20.4	0.2
6	13.6	1.4	20.6	0.3	20.4	0.2
7	14.7	1.4	20.7	0.3	20.4	0.2
8	17.5	1.2	20.7	0.3	20.4	0.2
9	19.7	1.4	20.6	0.3	20.4	0.2
10	21.4	1.8	20.6	0.3	20.4	0.2
11	22.0	1.8	20.6	0.3	20.4	0.2
12	22.1	1.5	20.6	0.3	20.4	0.2
13	22.0	1.5	20.6	0.3	20.4	0.2
14	21.6	1.9	20.6	0.3	20.5	0.2
15	20.7	2.1	20.6	0.3	20.5	0.2
16	19.6	1.7	20.6	0.3	20.4	0.2
17	18.2	1.0	20.6	0.3	20.4	0.2
18	17.2	0.9	20.6	0.3	20.4	0.2
19	16.6	1.0	20.6	0.3	20.4	0.2
20	16.1	1.0	20.6	0.3	20.4	0.2
21	15.7	1.2	20.6	0.3	20.4	0.2
22	15.4	1.1	20.6	0.3	20.4	0.2
23	15.1	1.1	20.6	0.3	20.4	0.2
24	14.8	1.3	20.6	0.3	20.4	0.2

**Tabla 8***Datos para la estimación de la radiación solar directa*

hora	Iluminancia [lux]	Desviación Estándar [lux]	Factor de luminosidad [-]	Factor de Sombra [-]	Radiación para cielos despejados [w]
1	0	0.0	0	1	0
2	0	0.0	0	1	0
3	0	0.0	0	1	0
4	0	0.0	0	1	0
5	0	0.0	0	1	0
6	0.3	0.2	0.0	1	138
7	1.5	0.7	0.1	1	881
8	4.1	1.0	0.2	1	1730
9	7.5	2.5	0.4	1	2563
10	10.3	3.6	0.5	1	3242
11	11.2	4.0	0.5	0	3648
12	10.0	3.4	0.5	0	3709
13	9.7	4.0	0.5	0	3412
14	8.3	4.5	0.4	0	2812
15	5.9	4.2	0.3	0	2016
16	3.4	2.7	0.2	0	1158
17	0.8	0.8	0.0	0	368
18	0	0.0	0	1	0
19	0	0.0	0	1	0
20	0	0.0	0	1	0
21	0	0.0	0	1	0
22	0	0.0	0	1	0
23	0	0.0	0	1	0
24	0	0.0	0	1	0

**Tabla 9***Propiedades, dimensiones y constantes*

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Constante de Stefan-Boltzman	$\sigma$	$5.67 \cdot 10^{-8}$	$\text{w m}^{-2} \text{K}^{-4}$
Aceleración de la gravedad	$g$	9.8	$\text{m s}^{-2}$
Masa de lodo dentro del digestor	$m_l$	5200	kg
Caudal semicontinuo de alimentación	$\dot{m}_{in}$	70	$\text{kg h}^{-1}$
Factor de visión de al manga	$f_m$	1	-
Emisividad de la manga	$\epsilon_m$	0.8	-
Emisividad del lodo	$\epsilon_l$	0.8	-
Área superficial de la manga	$A_m$	10.84	$\text{m}^2$
Área superficial del lodo	$A_l$	6.6	$\text{m}^2$
Área de contacto lodo-suelo	$A_s$	20.36	$\text{m}^2$
Conductividad térmica del aire	$k_v$	$23.94 \cdot 10^{-3}$	$\text{w m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica del biogás	$k_b$	$25.546 \cdot 10^{-3}$	$\text{w m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica de la geomembrana	$k_{geomembrana}$	0.19	$\text{w m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Espesor de la geomembrana	$e_{geomembrana}$	0.005	m
Longitud característica de la manga	$L_m$	0.26	m
Velocidad promedio del viento	$\langle V \rangle_v$	1.76	$\text{m s}^{-1}$
Capacidad calorífica del aire	$C_{p,v}$	1010	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Capacidad calorífica del biogás	$C_{p,b}$	1682.2	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Capacidad calorífica del lodo	$c_{p,l}$	4180	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Viscosidad dinámica del aire	$\mu_v$	$16.9 \cdot 10^{-6}$	Pa s
Viscosidad dinámica del biogás	$\mu_b$	$11.6 \cdot 10^{-6}$	Pa s
Viscosidad cinemática del aire	$\nu_v$	$14.06 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Viscosidad cinemática del biogás	$\nu_b$	$11.93 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Difusividad térmica del biogás	$\alpha_b$	$16.628 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Coefficiente de expansión térmica del biogás	$\beta_b$	$\frac{1}{T_b}$	$\text{K}^{-1}$

**Tabla 10**

*Resultados del balance de energía*

Hora del día	$T_m$ [°C]	$T_b$ [°C]	$S_m$ [w]	$Q_{r,m-c}$ [w]	$Q_{c,m-v}$ [w]	$Q_{r,m-l}$ [w]	$Q_{c,m-l}$ [w]	$Q_{cd,l-s}$ [w]	$Q_{cd,l-in}$ [w]	$Q_{cd,dt}$ [w]
1	12.9	16.8	0	427	-142	-188	-97	377	0	-662
2	12.6	16.6	0	431	-134	-195	-102	395	0	-692
3	12.5	16.6	0	433	-131	-199	-104	391	0	-693
4	12.4	16.5	0	435	-127	-201	-106	412	0	-720
5	12.2	16.4	0	437	-124	-205	-109	400	0	-714
6	12.1	16.4	0	439	-121	-207	-110	400	0	-718
7	13.0	16.8	0	426	-144	-186	-95	408	0	-690
8	15.1	17.9	0	393	-196	-136	-61	389	0	-586
9	16.9	18.8	0	366	-235	-94	-37	402	80	-613
10	18.1	19.4	0	340	-275	-63	-2	395	0	-460
11	32.5	26.6	1985	773	878	318	8	391	0	-65
12	31.3	25.9	1792	731	773	283	7	385	0	-95
13	29.9	25.3	1609	687	663	245	6	375	0	-125
14	26.3	23.4	1134	585	395	146	4	350	0	-200
15	21.7	21.1	578	471	78	26	1	339	0	-312
16	18.1	19.3	192	404	-28	-64	-22	354	0	-440
17	15.8	18.2	14	387	-202	-119	-52	356	0	-527
18	14.9	17.8	0	396	-192	-140	-64	352	0	-557
19	14.5	17.5	0	404	-180	-152	-72	356	0	-579
20	14.1	17.3	0	409	-171	-161	-78	356	0	-594
21	13.8	17.2	0	414	-164	-168	-83	356	0	-606
22	13.5	17.1	0	418	-157	-174	-87	364	0	-624
23	13.3	17.0	0	422	-151	-180	-91	364	0	-634
24	13.1	16.9	0	424	-147	-184	-93	369	0	-646

Apéndice C. Manual de operación de un BDG rural



Figura 17. Manual de operación de un biodigestor rural, vista frontal y posterior

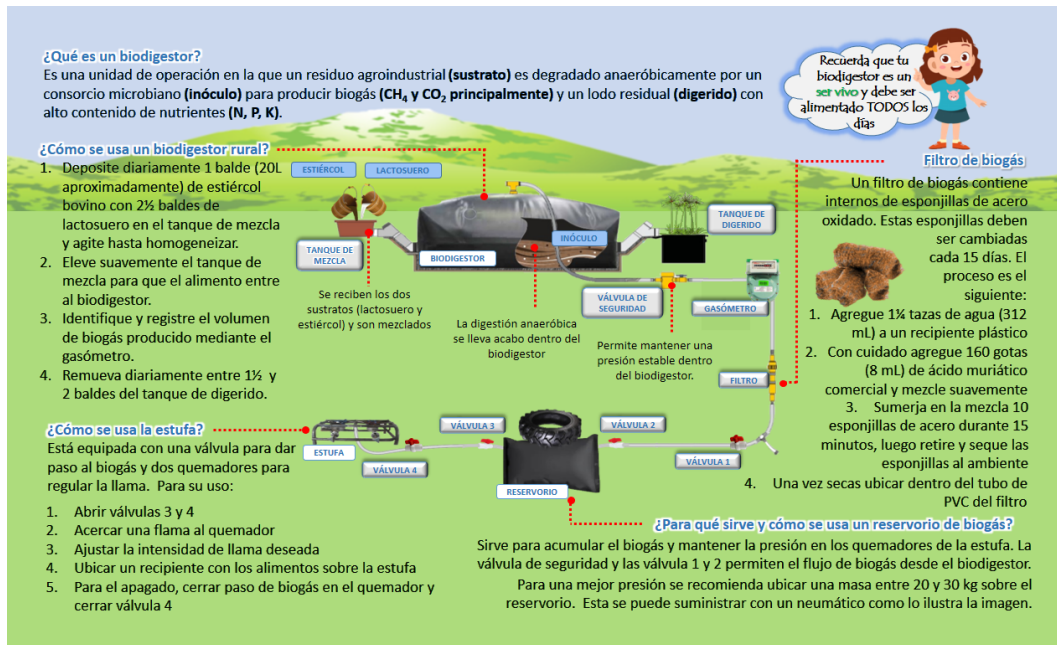


Figura 18. Manual de operación de un biodigestor rural, vista interior

## Apéndice D. Especificaciones técnicas de los sensores

Los sensores usados para registrar la temperatura de los sistemas implicados y la luminosidad ambiente fueron *dataloggers* a prueba de agua fabricados por HOBO Pendant®. A continuación, se describen los dos tipos de sensores empleados.

### 1. Sensor de temperatura



**Figura 19.** Sensor Datalogger de temperatura

Registra la temperatura del medio con el que esté en contacto, es pequeño y colgante. Además, cuenta con un LED indicador del estado. 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:  $-20^{\circ}$  a  $70^{\circ}\text{C}$
- Precisión:  $\pm 0.53^{\circ}\text{C}$  desde  $0^{\circ}$  a  $50^{\circ}\text{C}$
- Resolución:  $0.14^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$
- 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 e iluminancia



**Figura 20.** Sensor Datalogger de temperatura e iluminancia

Registra la temperatura e iluminancia ambiental, es pequeño y colgante. Además, cuenta con un LED indicador del estado. Nombre del modelo empleado: *HOBO Pendant® Temperature/Light 64K Data Logger*. 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.

#### 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:  $\pm 0.53$  ° 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/ft<sup>2</sup>)
- 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

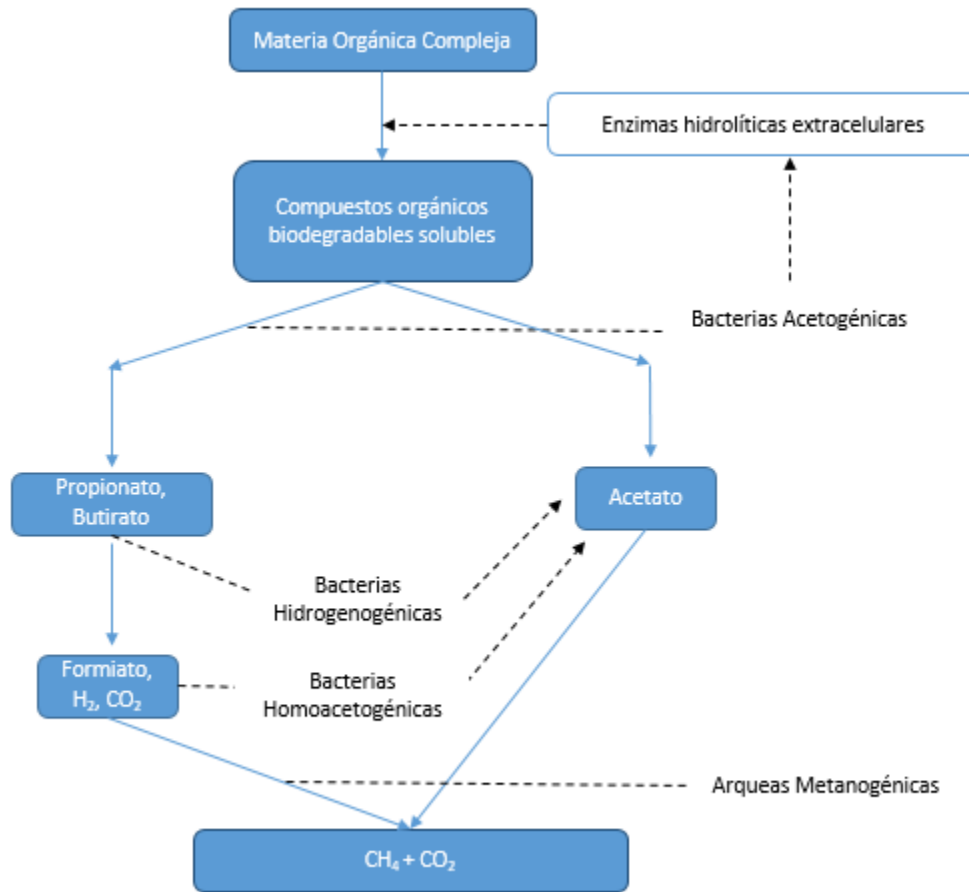
- Memoria: 64KB 28000 mediciones aproximadamente
- Materiales: Carcasa de polipropileno; tornillos de acero inoxidable; Anillo o Buna-N
- A prueba de agua: Hasta 30m
- Encerramiento: IP68

### 3. Lectura de datos de los sensores

Una vez se ha terminado el período de monitoreo, se retira el sensor, 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. La conexión Sensor-Base óptica-PC se ilustra en la siguiente figura:



**Figura 21.** Sensor Datalogger de temperatura e iluminancia

**Apéndice E.** Ruta metabólica generalizada de la Digestión Anaeróbica**Figura 22.** Ruta metabólica generalizada para DA

La ruta metabólica generalmente aceptada es presentada en la Figura 22, se evidencian las cuatro fases de la DA:

1. Hidrólisis. Reducción de la materia orgánica compleja (carbohidratos, lípidos y proteínas) a sus monómeros más simples a través de un proceso enzimático del cual se encargan las bacterias acetogénicas.

2. Acidogénesis. Debido a la acción de las bacterias acetogénicas, se generan los AGV principales de la DA: Acetato, Propionato, Butirato y después Formiato.
3. Acetogénesis. Los AGV producidos en la etapa anterior son transformados a acetato mediante la acción de las bacterias hidrogenogénicas y homoacetogénicas.
4. Metanogénesis. El acetato es transformado en metano y dióxido de carbono. Esta etapa es llevada a cabo por las arqueas metanogénicas.

De lo anterior se puede observar que un aumento en la proporción Propionato/acetato indica un problema con la comunidad metanogénica. Esto representa una baja producción y calidad del biogás, toda vez que el 70% del metano producido proviene de esta población microbiana.