

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES TUBULARES DE
BAJO COSTO ESCALA DOMÉSTICA

JUAN GUILLERMO JARAMILLO ARANGO
Ingeniero Químico

Trabajo de Investigación presentado como requisito para optar el título de
Magister en Ingeniería Química

Directores:

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ
Ingeniero Químico, Ph.D.

LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO
Ingeniera Química, Ph.D.

Asesor:
JAIME MARTÍ HERRERO
Físico , Ph.D.

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN INTERFASE
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2026

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	8
OBJETIVOS.....	10
Objetivo General	10
Objetivos Específicos.....	10
1. CAPÍTULO PRIMERO: MODELAMIENTO DE LA DINÁMICA TÉRMICA DEL BIODIGESTOR TUBULAR RURAL	11
1.1. Introducción	11
1.2. Estado del arte	12
1.3. Marco Teórico	13
1.4. Metodología	18
1.5. Resultados	20
1.6. Conclusiones.....	25
2. CAPÍTULO 2: MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DEL BIODIGESTOR TUBULAR RURAL	26
2.1. Introducción	26
2.2. Estado del arte	27
2.3. Marco teórico.....	28
2.4. Metodología	28
2.5. Resultados	29
2.6. Conclusiones.....	32
3. CAPÍTULO 3: COMPARACIÓN DEL AISLANTE Y EL INVERNADERO, ANÁLISIS TÉRMICO Y DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	33
3.1. Introducción	33
3.2. Estado del arte	34
3.3. Marco teórico.....	35
3.4. Metodología	35
3.5. Resultados	36
3.6. Conclusiones.....	39
4. REFERENCIAS	40

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Funcionalidad de la Temperatura respecto del TRH en BDG tubulares. Adaptado de Martí-Herrero (2019).	11
Figura 2. Comparación modelos de transferencia de calor en DA	13
Figura 3. Resistencias térmicas del digestor tubular de bajo costo. gc: cubierta invernadero; ga: aire invernadero; gh: cubierta BDG; b: biogás; s: <i>slurry</i> ; ins: aislante.....	14
Figura 4. Izquierda: Diseños bioclimáticos ABCD y Ubicación de sensores (estrellas). Derecha: Sensor datalogger HOBO-Pendant.....	18
Figura 5. Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario A. Ambiente en azul, suelo en gris, slurry experimental en verde y slurry calculada en rojo.	22
Figura 6. Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario B. Ambiente en azul, suelo en gris, slurry experimental en verde y slurry calculada en rojo.	22
Figura 7. Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario C. Ambiente en azul, suelo en gris, slurry experimental en verde y slurry calculada en rojo.	23
Figura 8. Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario D. Ambiente en azul, suelo en gris, slurry experimental en verde y slurry calculada en rojo.	23
Figura 9. Temperaturas experimentales y validación del modelo en escenario C2. Ambiente en azul, suelo en gris, slurry experimental en verde y slurry calculada en rojo.	24
Figura 7. Cinética del BDG semicontinuo	28

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades térmicas de los materiales de construcción de los BDG	17
Tabla 2. Ubicación de los BDGs seleccionados	19
Tabla 3. Valores ajustados de coeficientes convectivos y conductividad térmica	21
Tabla 4. Datos operacionales de los escenarios	30
Tabla 5. Ubicaciones usadas para obtención de datos ambientales	36

LISTADO DE ABREVIATURAS

<i>amb</i> :	ambiente
<i>gc</i> :	cubierta del invernadero
<i>ga</i> :	aire en el invernadero
<i>gh</i> :	cubierta del BDG
<i>b</i> :	biogás en la campana del reactor
<i>ins</i> :	aislante con el suelo
<i>s</i> :	<i>Slurry</i> , lodo en el volumen de operación
<i>gr</i> :	suelo
<i>m_{feed}</i> :	masa de alimento fresco [<i>kg</i>]
<i>Q_{i,j-k}</i> :	Calor transferido por mecanismo <i>i</i> , desde <i>j</i> hacia <i>k</i> . [<i>W</i>]
<i>I_r</i> :	Irradiancia [<i>W m⁻²</i>]
<i>f_{cl}</i> :	Factor de claridad atmosférica [-]
<i>τ_i</i> :	Transmisividad de <i>i</i> [-]
<i>α_i</i> :	Absortividad de <i>i</i> [-]
<i>ε_i</i> :	Emisividad de <i>i</i> [-]
<i>d_i</i> :	espesor o altura de <i>i</i> [<i>m</i>]
<i>A_{i-j}</i> :	Área disponible para transferencia entre las superficies <i>i, j</i> [<i>m²</i>]
<i>F_{i-j}</i> :	Factor de visión entre de <i>i</i> hacia <i>j</i> [-]
<i>ρ</i> :	densidad del lodo o <i>slurry</i> [<i>kg m⁻³</i>]
<i>C_{ps}</i> :	capacidad calorífica del lodo o <i>slurry</i> [<i>J kg⁻¹K⁻¹</i>]
<i>k_i</i> :	Conductividad térmica de <i>i</i> [<i>W m⁻¹</i>]
<i>V_{op}</i> :	Volumen de operación [<i>m³</i>]
<i>h_i</i> :	Coefficiente de intercambio de calor convectivo del medio <i>i</i> [<i>W m⁻² K⁻¹</i>]
<i>y₁</i> :	Toma valor de 1 ó 0 cuando hay o no invernadero, respectivamente [-]
<i>y₂</i> :	Toma valor de 1 ó 0 cuando hay o no aislante con el suelo, respectivamente [-]
<i>y₃</i> :	Toma valor de 1 ó 0 cuando hay o no alimentación, respectivamente [-]
VCO:	Velocidad de Carga Orgánica
TRH:	Tiempo de Retención Hidráulico

Resumen

Título: evaluación del diseño bioclimático en biodigestores tubulares de bajo costo escala doméstica*

Autor: Juan Guillermo Jaramillo Arango**

Palabras clave: Digestión anaeróbica, modelo matemático, comportamiento térmico

Descripción:

La digestión anaeróbica representa una solución estratégica para la gestión de residuos orgánicos y la producción de energía en zonas rurales con limitaciones en el acceso a combustibles convencionales, como ocurre en muchas regiones de Colombia. Sin embargo, su eficiencia depende en gran medida de las condiciones térmicas, dado que los microorganismos responsables de la metanogénesis son altamente sensibles a las bajas temperaturas. En respuesta a esta limitante, se han implementado estrategias de diseño bioclimático como el uso de invernaderos y aislantes con el suelo, cuya eficacia real no había sido evaluada sistemáticamente a escala doméstica.

Esta investigación abordó la evaluación de estas estrategias mediante el desarrollo y validación de modelos térmicos y cinéticos simplificados, aplicados en diferentes escenarios experimentales y simulados. Los resultados muestran que, aunque el uso de aislante con el suelo tiene un mayor impacto térmico que el invernadero, logrando aumentos de hasta 5 °C en la temperatura del slurry, este incremento no es suficiente para modificar significativamente la producción de biogás. De hecho, las simulaciones en climas cálidos y fríos demostraron que las diferencias térmicas inducidas por el diseño bioclimático no se traducen en mejoras sustanciales en el rendimiento del biodigestor.

Así, la conclusión más relevante del estudio es que, si bien las estrategias bioclimáticas mejoran la condición térmica del reactor, su efecto no es determinante sobre la cantidad de biogás producido. Esto implica que otras variables como la temperatura ambiental, el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica continúan siendo los principales factores que condicionan la eficiencia del proceso. Por lo tanto, aunque el aislamiento y los invernaderos pueden aportar beneficios complementarios como la protección estructural y la estabilización térmica, no deben considerarse como estrategias suficientes por sí solas para aumentar la producción de biogás en biodigestores rurales.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Humberto Escalante. Codirectora Liliana Castro. Asesor: Jaime Martí Herrero

Abstract

Title: evaluación del diseño bioclimático en biodigestores tubulares de bajo costo escala doméstica*

Autor: Juan Guillermo Jaramillo Arango**

Key Words: Anaerobic digestion, Mathematic model, Thermal behavior

Description:

Anaerobic digestion represents a strategic solution for the management of organic waste and energy production in rural areas with limited access to conventional fuels, as is the case in many regions of Colombia. However, its efficiency largely depends on thermal conditions, since the methanogenic microorganisms responsible for biogas production are highly sensitive to low temperatures. In response to this limitation, bioclimatic design strategies such as the use of greenhouses and soil insulation have been implemented, though their actual effectiveness at the household scale had not been systematically evaluated.

This research assessed the impact of these strategies through the development and validation of simplified thermal and kinetic models, applied in various experimental and simulated scenarios. The results show that although soil insulation has a greater thermal impact than greenhouses—achieving temperature increases of up to 5 °C in the slurry—this rise is not sufficient to significantly alter biogas production. In fact, simulations conducted in both warm and cold climates demonstrated that the thermal differences induced by bioclimatic design do not result in substantial improvements in digester performance.

Therefore, the most relevant conclusion of the study is that, although bioclimatic strategies improve the thermal condition of the reactor, their effect is not decisive in determining the amount of biogas produced. This implies that other variables such as ambient temperature, hydraulic retention time, and organic loading rate remain the primary factors governing process efficiency. Consequently, while insulation and greenhouses may offer complementary benefits such as structural protection and thermal stabilization, they should not be regarded as sufficient standalone strategies for increasing biogas production in rural digesters.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Humberto Escalante. Codirectora Liliana Castro. Asesor: Jaime Martí Herrero

INTRODUCCIÓN GENERAL

La digestión anaeróbica gestiona y valoriza residuos orgánicos transformándolos en un biogás rico en metano (60% CH₄) y un lodo fertilizante. Este bioproceso se ha mostrado útil para la población colombiana ubicada en la frontera agrícola, en los territorios con difícil acceso y en las zonas sin conexión al sistema nacional de gas combustible. Es por esto que existen 5700 registros de biodigestores rurales ante el ministerio del ambiente (Tavera-Ruiz et al., 2023).

La digestión anaeróbica se da a través de cuatro etapas secuenciales: la hidrólisis, donde ocurre una reducción de la materia orgánica compleja (carbohidratos, lípidos y proteínas) en sus monómeros más simples a través de un proceso enzimático; la acidogénesis, donde se generan los ácidos grasos volátiles principales de la digestión anaeróbica; la acetogénesis, donde los ácidos grasos volátiles son transformados en acetato; y la metanogénesis, donde el acetato se transforma en metano (Ferrer & Pérez, 2010).

Una de las limitantes de la digestión anaeróbica son las bajas temperaturas. Del conjunto de microorganismos encargados del proceso, las archeas metanogénicas son la población más sensible frente a cambios de temperatura (Luo et al., 2020). La digestión anaeróbica puede llevarse a cabo en rangos termofílicos (>50°C) y mesofílicos (50-25°C) sin riesgo de inhibición de los metanógenos (Yadvika et al., 2004). Operar en el rango psicofílico (<20°C) disminuye considerablemente la actividad de la población metanogénica (Jaimes-Estévez et al., 2018).

En Colombia, el 60% de los municipios tienen climas fríos y templados (Resolución 549 de 2015) y el 30% de la frontera agrícola nacional presenta temperaturas del orden psicofílico (UPRA - IDEAM, 2022). En estas zonas, los usuarios de la digestión anaeróbica, con el fin de mitigar las bajas temperaturas, han instalado invernaderos y aislado el biodigestor (BDG) del suelo con poliestireno expandido, pero la influencia de una o ambas estrategias no está estudiada en escenarios reales en la escala rural, por lo que no hay claridad de su conveniencia.

Para determinar la conveniencia de un diseño bioclimático con invernadero o aislante antes de su construcción se debe modelar el proceso de transferencia de calor, mediante sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas que predicen la dinámica térmica y la producción de biogás. Sin embargo, estos sistemas presentan vacíos en las definiciones de sus

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

ecuaciones o no tienen claridad en la estimación de sus parámetros. Además, las metodologías de los sistemas de ecuaciones no contemplan el ajuste simultáneo en varios escenarios experimentales, lo que dificulta su uso en otras ubicaciones y con otros diseños bioclimáticos.

Adicionalmente, la solución de este tipo de modelos matemáticos exige un alto costo computacional y datos de entrada de difícil consecución, por esto son poco usados; en la realidad de la escala rural se siguen reglas empíricas para el diseño, construcción y puesta en marcha del reactor tubular de bajo costo.

Esta investigación se pregunta ¿Cómo determinar el efecto del invernadero y el aislante en biodigestores rurales de manera simplificada? Y lo aborda desde tres perspectivas: i) la dinámica térmica, ii) la producción de biogás y iii) la ganancia económica.

Este trabajo de investigación se dividió en tres capítulos, en el primero se estudia la dinámica térmica de BDGs rurales con diferentes diseños bioclimáticos a partir de sus perfiles de temperaturas experimentales y el ajuste de un modelo térmico simplificado. En el segundo capítulo se selecciona un modelo cinético para BDGs rurales y se valida con datos experimentales de producción de biogás. En el tercer capítulo se compara el efecto del invernadero y el aislante en el rendimiento de biogás, simulando sistemas con las mismas condiciones operacionales, ambientales y de diseño. Finalmente, se consideró la ganancia económica a partir de la cantidad de energía reemplazada por el biogás y su precio promedio nacional. Los resultados de esta investigación ayudarán a la academia y los usuarios de la digestión anaeróbica a tomar decisiones prácticas en la escala rural.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Evaluar el efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico y la producción de biogás en biodigestores de bajo costo.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar un modelo simplificado que describa la dinámica térmica de biodigestores rurales con diferentes diseños bioclimáticos a partir de perfiles de temperatura experimentales.
- Determinar un modelo simplificado que describa el rendimiento de biodigestores rurales en función de la temperatura de operación, a partir de registros experimentales de producción de biogás.
- Comparar el uso de aislante e invernadero bajo las mismas condiciones operacionales, ambientales y de diseño, a través de una simulación térmica y de producción de biogás.

2. CAPÍTULO PRIMERO: MODELAMIENTO DE LA DINÁMICA TÉRMICA DEL BIODIGESTOR TUBULAR RURAL

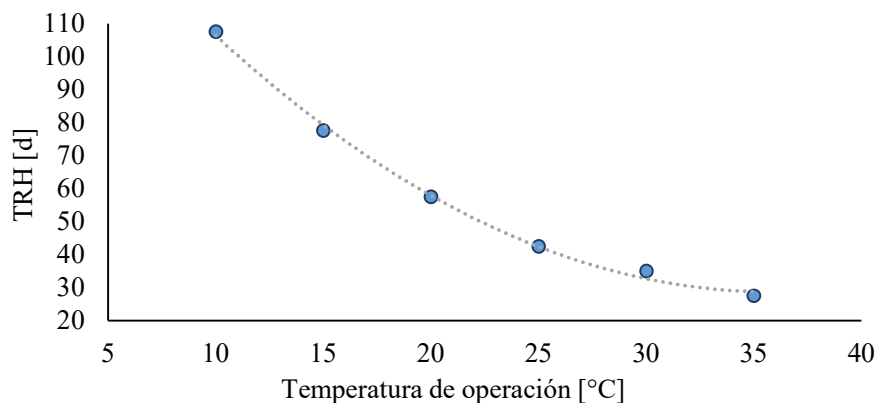
2.1 Introducción

Un modelo térmico es toda relación lógico-matemática que describe, ejemplifica o predice las propiedades de un sistema y los fenómenos que le ocurren a partir de su temperatura y su intercambio de calor (Donoso-Bravo, 2020).

En digestión anaeróbica es común el uso de un modelo térmico para fijar el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) antes de la instalación del reactor mediante relaciones empíricas, asumiendo la temperatura de operación como la temperatura ambiente local (Martí-Herrero, 2019), esto puede verse en la Figura 1.

Figura 1

Funcionalidad de la Temperatura respecto del TRH en BDG tubulares. Adaptado de Martí-Herrero (2019).



La tendencia del TRH y la temperatura obedece la ecuación 1, por lo que en ambientes fríos se necesita mayor TRH, lo cual implica mayor volumen para tratar cantidades iguales de materia orgánica en ambientes cálidos.

$$TRH = 0.116 T_{op}^2 - 8.23 T_{op} + 178 \quad (ec-1)$$

Según los datos de Martí-Herrero (2019), en ambientes psicrófilicos una disminución de 5°C requiere un aumento de 20 a 30 días en el TRH. Por lo anterior, la predicción de la condición térmica del slurry ayuda a prevenir errores de dimensionamiento por asignación de

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

cargas o TRH inadecuados. Para realizar esta predicción se hace necesario estudiar y modelar el intercambio de calor entre el biodigestor rural y su entorno.

2.2 Estado del arte

Axaopoulos et al., (2001) y Gebremendhin et al., (2005) fueron los primeros en proponer un sistema de ecuaciones para explicar la dinámica térmica del biodigestor, sin embargo, ambas investigaciones presentaron errores considerables en la predicción de la condición térmica. En 2012, Perrigault et al. desarrollan uno de los modelos más precisos, reduciendo los errores al orden de 1°C, pero presentando vacíos en las definiciones de los números adimensionales.

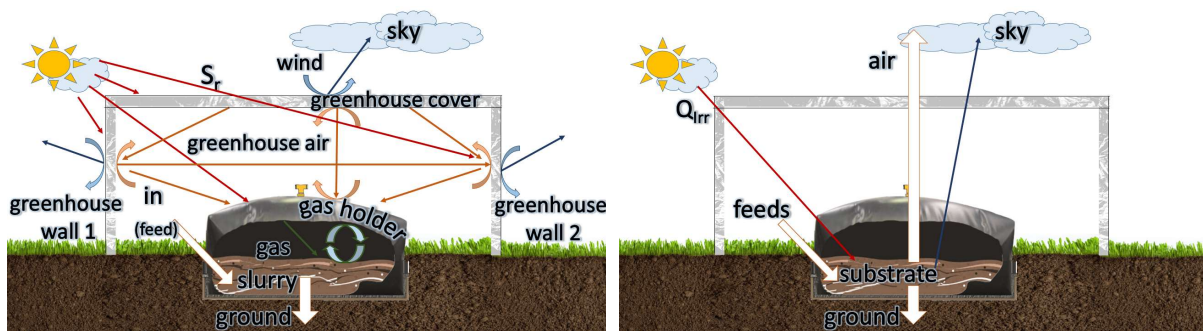
Posteriormente, el modelo de Perrigault et al. (2012) fue implementado por Weatherford et al. (2015), en donde observó el comportamiento de la temperatura del slurry en múltiples puntos del volumen de operación, demostrando experimentalmente que la temperatura ponderada del slurry es similar a la de la salida del digestor, pero sin completar el sistema de ecuaciones. Estos estudios demostraron que es posible estimar las temperaturas del volumen de operación en biodigestores tubulares de bajo costo a través de un modelo clásico de transferencia de calor.

En 2020, Vilms et al., exponen un modelo en el cual el biogás, el aire del invernadero, la cubierta del invernadero y la del digestor, actúan como resistencias térmicas con valores constantes, estos valores fueron ajustados para digestores de domo fijo y UASB, pero no es clara su estimación. Aun así, los autores proponen una simplificación que facilita el cálculo de las temperaturas del lodo en el volumen de operación. La Figura 2 es una representación de los modelos actuales usando la nomenclatura propuesta por cada investigación; en esta gráfica cada una de las flechas simbolizan una transferencia de calor.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Figura 2.

Comparación modelos de transferencia de calor en DA



Perrigault et al. 2012

Vilms et al. 2020

Para predecir la temperatura de operación de un biodigestor se deben implementar modelos clásicos para describir los tres mecanismos de transferencia de calor. Pero, las metodologías de las anteriores investigaciones no contemplan el ajuste simultáneo en varios escenarios experimentales, lo que dificulta el uso del modelo en reactores con otras ubicaciones y con otras configuraciones.

2.3 Marco Teórico

El slurry dentro del biodigestor intercambia calor con el aire ambiental y el suelo a través de los mecanismos de convección y conducción. La única fuente de calentamiento del slurry es la energía que recibe como irradiancia solar, la cual es filtrada por el material de la cubierta o invernadero y del reactor mismo. El reactor emite radiación hacia el cielo de manera constante, el cual actúa como un cuerpo negro a baja temperatura (Axaopoulos et al., 2001) (Gebremendhin et al., 2005).

Ya que la digestión anaeróbica requiere altos niveles de dilución en la alimentación, se ha demostrado que propiedades como la conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad del alimento fresco y del volumen de operación son similares a las del agua, independientemente del sustrato utilizado (Perrigault et al., 2012). En el momento en que el alimento fresco entra al reactor, intercambia energía con el slurry hasta igualar su temperatura; este efecto se denomina advección (Vilms et al., 2020).

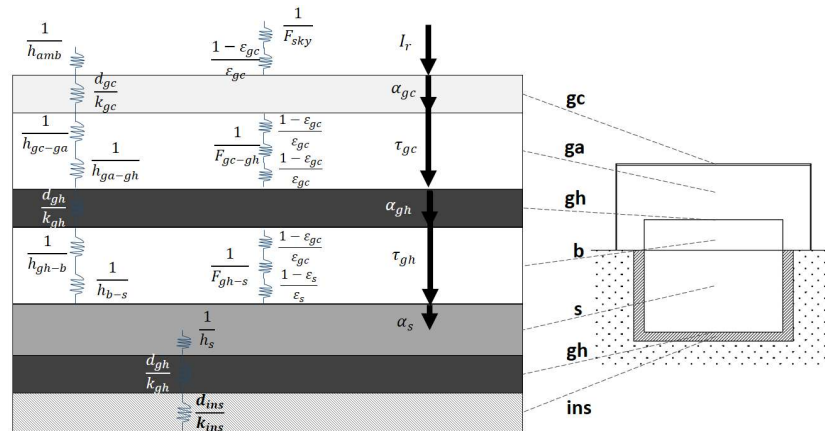
El presente estudio contempla la transferencia de calor del BDG en tres categorías: radiativa (r), conductiva/conectiva (c) y advectiva (adv). Las resistencias a la transferencia de calor pueden verse en la Figura 3. En esta figura se presenta la entrada de radiación como

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

flechas y se muestran las resistencias térmicas con el ambiente y el suelo mediante la analogía a la resistencia eléctrica.

Figura 3

Resistencias térmicas del digester tubular de bajo costo. gc: cubierta invernadero; ga: aire invernadero; gh: cubierta BDG; b: biogás; s: slurry; ins: aislante



A continuación, se muestran las suposiciones realizadas:

- Las temperaturas de la cubierta del invernadero y la cubierta del digester son iguales en todas sus superficies.
- Para el aire del invernadero y el biogás la estratificación de la temperatura respecto de la altura es despreciable.
- Las capacitancias caloríficas de la cubierta del invernadero, el aire del invernadero, la cubierta del digester y el biogás son despreciables.
- La emisividad es constante y depende únicamente de la naturaleza del material.
- Los factores de visión entre la cubierta del invernadero, la cubierta del digester y la superficie de slurry, pueden ser estimados como placas paralelas separadas a una altura media.
- El sistema emite radiación infrarroja hacia el cielo, el cual se comporta como un cuerpo negro con temperatura equivalente a $T_{sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5}$ (Vilms et al., 2020).
- La radiación infrarroja no es absorbida por los gases.
- La radiación solar reflejada dentro del sistema es despreciable.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

- i) La fracción de radiación solar reflejada fuera del sistema es el complemento de la fracción de radiación solar que llega al *slurry*.
- j) La transmitancia, absorbancia y reflectancia de las superficies son independientes de la dirección de la radiación solar incidente.
- k) Las propiedades del alimento son iguales a las del *slurry*, excepto por su temperatura, que es igual a la del suelo.
- l) La temperatura del suelo no se ve afectada por la del BDG.
- m) Las propiedades térmicas del suelo son constantes.
- n) El volumen de gas contenido por el BDG es constante, por lo tanto, las pérdidas por trabajo de flujo del biogás son despreciables.
- o) Las pérdidas por evaporación dentro del BDG son despreciables.
- p) La generación de calor debido a la biorreacción es despreciable.
- q) La biorreacción se encuentra en estado estable.
- r) La transferencia de calor a través de los tubos de alimentación y salida es despreciable.
- s) Los coeficientes de intercambio de calor por mecanismo convectivo son constantes.

Como muestra la ecuación 2, el modelo describe el balance de energía del *slurry*. Adicionalmente, se contemplan tres variables booleanas y_i para definir la hora de alimentación y la presencia o no del invernadero y el aislante con el suelo.

$$\rho C_P V_{op} \frac{dT_s}{dt} = Q_{Irr} + Q_{c,gr-s} + Q_{r,amb-s} + Q_{c,amb-s} + Q_{adv} \quad (ec-2)$$

$$\text{Donde: } Q_{Irr} = A_{s,sup} f_{cl} I_r \alpha_s \left[\left(1 + y_1 (\tau_{gc} + \alpha_{gc} - 1) \right) (\tau_{gh} + \alpha_{gh}) \right] \quad (ec-3)$$

$$Q_{r,amb-s} = \frac{A_{s-amb} \sigma \left((0.0552 T_{amb}^{1.5})^4 - T_s^4 \right)}{1 + y_1 \left(2 \left(\frac{1 - \varepsilon_{gc}}{\varepsilon_{gc}} \right) + \frac{1}{F_{gc-gh}} \right) + 2 \left(\frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m} \right) + \frac{1}{F_{gh-s}} + \left(\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s} \right)} \quad (ec-4)$$

$$Q_{c,gr-s} = \frac{A_{s-gr} (T_{gr} - T_s)}{y_2 \left(\frac{d_{ins}}{k_{ins}} + \frac{d_{gh}}{k_{gh}} + \frac{1}{h_s} \right)} \quad (ec-5)$$

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

$$Q_{c, amb} = \frac{A_{s-amb} (T_{amb} - T_s)}{\frac{1}{h_{amb}} + y_1 \left(\frac{d_{gc}}{k_{gc}} + \frac{2}{h_{ga}} \right) + \frac{d_{gh}}{k_{gh}} + \frac{2}{h_b}} \quad (ec-6)$$

$$Q_{adv} = y_3 m_{feed} C_{P_s} (T_{amb} - T_s) \quad (ec-7)$$

Donde *amb*: ambiente

gc: cubierta del invernadero

ga: aire en el invernadero

gh: cubierta del BDG

b: biogás en la campana del reactor

ins: aislante con el suelo

s: *Slurry*, lodo en el volumen de operación

gr: suelo

m_{feed}: masa de alimento fresco [*kg*]

Q_{i,j-k}: Calor trasferido por mecanismo *i*, desde *j* hacia *k*. [*W*]

Ir: Irradiancia [*W m⁻²*]

f_{cl}: Factor de claridad atmosférica [–]

τ_i: Transmisividad de *i* [–]

α_i: Absortividad de *i* [–]

ε_i: Emisividad de *i* [–]

d_i: espesor o altura de *i* [*m*]

A_{i-j}: Área disponible para transferencia entre las superficies *i, j* [*m²*]

F_{i-j}: Factor de visión de *i* hacia *j* [–]

ρ: densidad del lodo o *slurry* [*kg m⁻³*]

C_{P_s}: capacidad calorífica del lodo o *slurry* [*J kg⁻¹ K⁻¹*]

k_i: Conductividad térmica de *i* [*W m⁻¹*]

V_{op}: Volumen de operación [*m³*]

h_i: Coeficiente de intercambio de calor convectivo del medio *i* [*W m⁻² K⁻¹*]

y₁: Toma valor de 1 ó 0 cuando hay o no invernadero, respectivamente [–]

y₂: Toma valor de 1 ó 0 cuando hay o no aislante con el suelo, respectivamente [–]

y₃: Toma valor de 1 ó 0 cuando hay o no alimentación, respectivamente [–]

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Se usó el sub-modelo de Hillel, citado por Vilms et al. (2020), para estimar la temperatura del suelo (T_{gr}) a 1 metro de profundidad. En este sub-modelo la condición térmica del suelo se predice a partir de las propiedades del ambiente. La amplitud de la onda sinusoidal (ϕ) corresponde a la mitad de la diferencia entre las medias ambiente máxima y mínima. Por su parte, t_0 es el día más frío del año, este valor puede determinarse a partir del ajuste del modelo con datos experimentales.

$$T_{gr} = (\overline{T_{amb}} + 2) + \phi \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \sin\left(\omega(t - t_0) - \frac{z}{D} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (ec-8)$$

$$D = \sqrt{\frac{2 * 3600 * 24 * k_{gr}}{\omega \rho_{gr} C_{p,gr}}} \quad (ec-9)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{365} \quad (ec-10)$$

Donde: $\overline{T_{amb}}$ temperatura media ambiente [°C]

ϕ : amplitud de la curva sinusoidal [°C]

t_0 : constante de fase [d]

D : profundidad de amortiguamiento [m]

ω : frecuencia angular anual

z : profundidad [m]

Los valores de transmitancia, absortividad, emisividad, densidad, conductividad térmica, capacidad calorífica de los materiales de construcción de los BDG se tomaron de Perrigault et al. (2012) y se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Propiedades térmicas de los materiales de construcción de los BDG

Materiales	τ [-]	α [-]	ε [-]	ρ [kg m ⁻³]	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	C_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
gc	0.65	0.20	0.20	---	$35 * 10^{-3}$	---
ga	---	---	---	1.202	$24 * 10^{-3}$	1010
gh	0.00	0.80	0.80	---	$19 * 10^{-3}$	---
b	---	---	---	1.156	$26 * 10^{-3}$	1682
s	0.00	0.80	0.67	1000	---	4180

gc: cubierta invernadero; **ga**: aire invernadero; **gh**: cubierta BDG; **b**: biogás; **s**: slurry

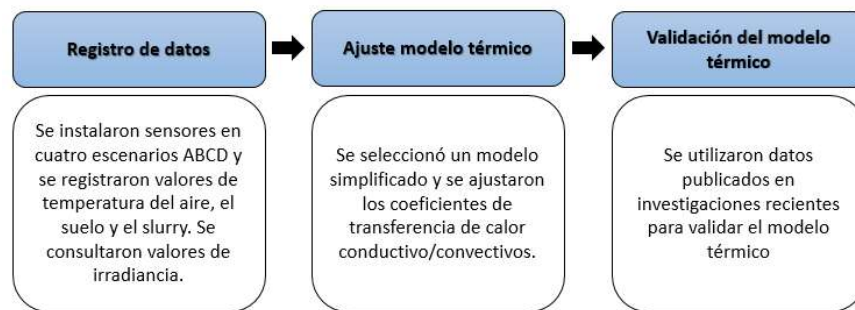
EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

2.4 Metodología

Con el fin de determinar el efecto térmico del diseño bioclimático, se diseñó un experimento con dos variables categóricas en cuatro escenarios experimentales: A) digestor sin invernadero ni aislante, B) digestor con invernadero, sin aislante, C) digestor sin invernadero, con aislante y D) digestor con invernadero y aislante. La presente metodología se representa en el siguiente diagrama de flujo de la figura 4.

Figura 4

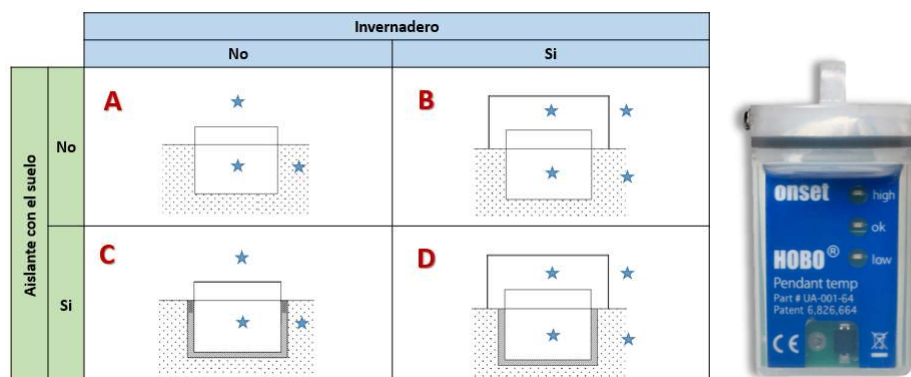
Metodología primer capítulo



Se llevó a cabo el registro de temperaturas en los cuatro digestores con diseños ABCD mediante sensores HOBO Pendant, como se representa en la Figura 5. Se hicieron registros horarios de las temperaturas del aire ambiental (T_{amb}), el aire en el invernadero (T_{ga}), el slurry en el volumen de operación (T_s) y el suelo (T_{gr}), y se permitió una ventana de observación de 30 días.

Figura 5

Izquierda: Diseños bioclimáticos ABCD y Ubicación de sensores (estrellas). Derecha: Sensor datalogger HOBO-Pendant.



EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Para los datos de radiación solar, se obtuvieron como “All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance” a partir de la base de datos POWER (NASA, 2023) para cada ubicación se corrigió mediante un factor normalizado extraído de los datos de luminosidad in situ recopilados para cada hora. Para la validación se usaron datos experimentales reportados por Martí-Herrero et al., (2018), este escenario se denominó C2. Las ubicaciones de todos los digestores seleccionados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Ubicación de los BDGs seleccionados

Escenario	Ubicación	Latitud – Longitud	Altitud [m.s.n.m.]	Volumen de operación [m ³]	TRH [d]	Referencia
A	Cáchira, Norte de Santander	N: 7°44'06" O: 73°03'05"	1926	5.2	70	Este estudio
B	Güicán, Boyacá	N: 6°27'45'' O: 72°24'43''	2963	101	35	Jaramillo et al., (2021)
C	Cáchira, Norte de Santander	N: 7°44'01" O: 73°03'15"	1900	5.2	70	Este estudio
C2	Cochabamba, Bolivia	S: 17°23'37" O: 66°09'25"	2572	8.3	29	Martí-Herrero et al., (2018)
D	Floresta, Boyacá	N: 5°51'42" O: 2°57'52"	2753	28	20	Este Estudio

El ajuste del modelo térmico se realizó minimizando en simultáneo los errores cuadráticos medios (RMSE) de cada escenario experimental. Para esto se definió el error

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

acumulado como la norma euclidiana de un vector (\vec{p}) cuyas componentes corresponden a los RMSE de cada escenario, como se muestra en las ecuaciones (ec-11) y (ec-12).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(T_{s,calculada} - T_{s,experimental})^2}{n}} \quad (ec-11)$$

$$\vec{p} = [RMSE_A \quad RMSE_B \quad RMSE_C \quad RMSE_D] \quad (ec-12)$$

A través del método GRG nonlinear se estimaron los valores de coeficientes convectivos y conductividad térmica del aislante que minimizaron la norma de \vec{p} , el ajuste se realizó en el software Microsoft Excel. Los rangos y valores semillas se determinaron a partir de los datos experimentales y las ecuaciones expuestas por Perrigault et al., (2012).

2.5 Resultados

En la tabla 3, se presentan los valores estimados para los coeficientes convectivos (h) y conductividad térmica (k) del aislante. Se determinaron los rangos para cada variable a partir de las ecuaciones de Perrigault et al., (2012), los valores semilla fueron tomados como la media del rango en cada variable. Se encontró que los coeficientes del aire ambiental y el biogás son 10 a 15 veces mayores a los reportados por Vilms et al., (2020) para reactores de domo fijo y UASB, lo que significa que el reactor rural de bajo costo interactúa más con el ambiente que otros diseños.

De manera contraria, el coeficiente convectivo con el suelo presenta valores menores en reactores tubulares de bajo costo que en reactores de cúpula fija y UASB. Lo anterior es consecuencia de la cantidad de área disponible, mayor con el suelo que con el ambiente, y la diferencia de temperatura de estos con el volumen de operación. En conclusión, el slurry tiene mayor interacción convectiva con el ambiente que con el suelo.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Tabla 3.*Valores ajustados de coeficientes convectivos y conductividad térmica*

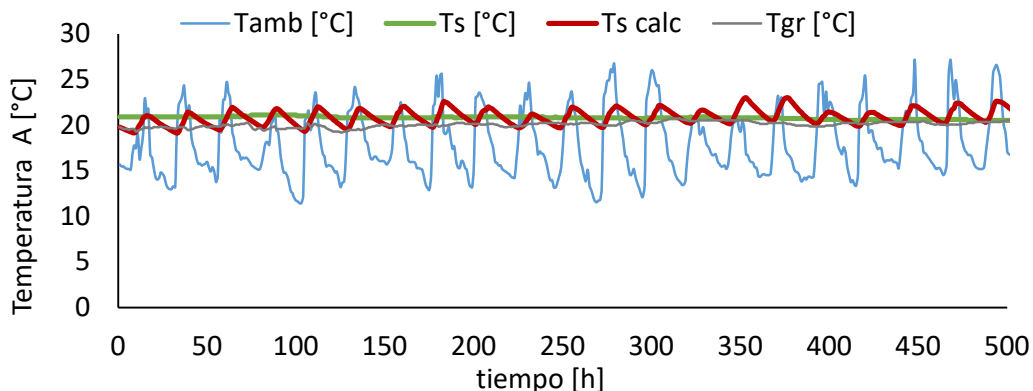
Variable	Unidades	Rango	Valor semilla	Valor ajustado	Vilms (2020)
h_{amb}	W/m^2K	4.8 – 76.0	40.4	35.9	3.55
h_{ga}	W/m^2K	0.012 – 27.0	13.5	18.1	-
h_b	W/m^2K	0.05 – 20.0	10.0	32.1	2.2 – 2.7
h_s	W/m^2K	10 – 1000	500	20.0	177 – 245
k_{ins}	$W/m K$	0.03 – 0.50	0.04	0.031	0.035 – 1.8

Por su parte, la conductividad térmica (k) del aislante se ajustó en un valor cercano al reportado en el artículo en referencia (Vilms et al., 2020). Este resultado muestra que el poliestireno expandido conservó sus propiedades aislantes aun cuando soporta todo el peso del digestor y está en contacto con el suelo. Respecto a los perfiles de temperatura, en las figuras de la 6 a la 9 se muestra el seguimiento experimental y el resultado del modelo para cada escenario ABCD. Como puede verse, al modelo le cuesta reproducir la inercia térmica del slurry en el escenario A, reactor expuesto a la intemperie, sin embargo, el error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.88°C.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Figura 6.

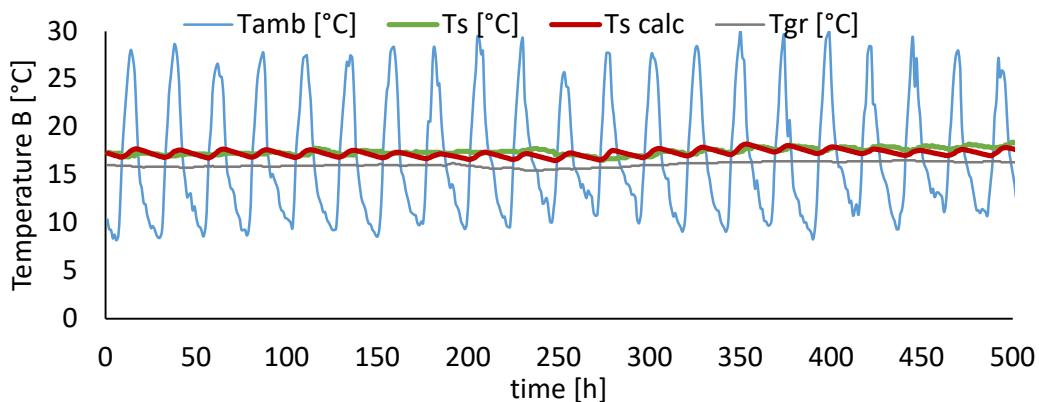
Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario A.



En el escenario anterior, la temperatura del suelo y la del slurry estuvieron en equilibrio. En la figura 7, el escenario B, sin aislante con invernadero, muestra un mejor ajuste y revela una ligera separación entre la temperatura del suelo y la del slurry dentro del volumen de operación. Para este escenario el RMSE fue de 0.45°C.

Figura 7.

Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario B.



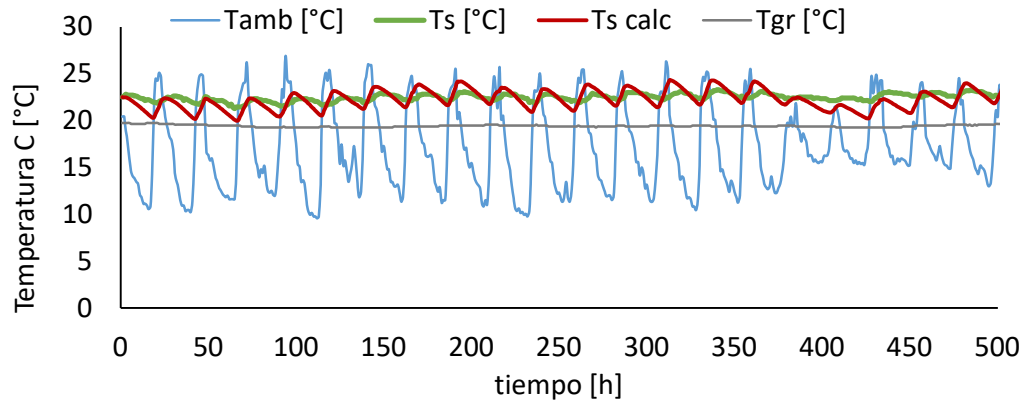
Lo anterior implica que el escenario B alcanzó a aprovechar la suficiente energía térmica para elevar cerca de 1.4°C la temperatura de su volumen de operación con respecto a la del suelo. Sin embargo, el escenario C, que solo tenía aislante con el suelo, demostró mayor

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

capacidad de separar 3.4°C las temperaturas del slurry y del suelo. Este resultado se muestra en la figura 8.

Figura 8

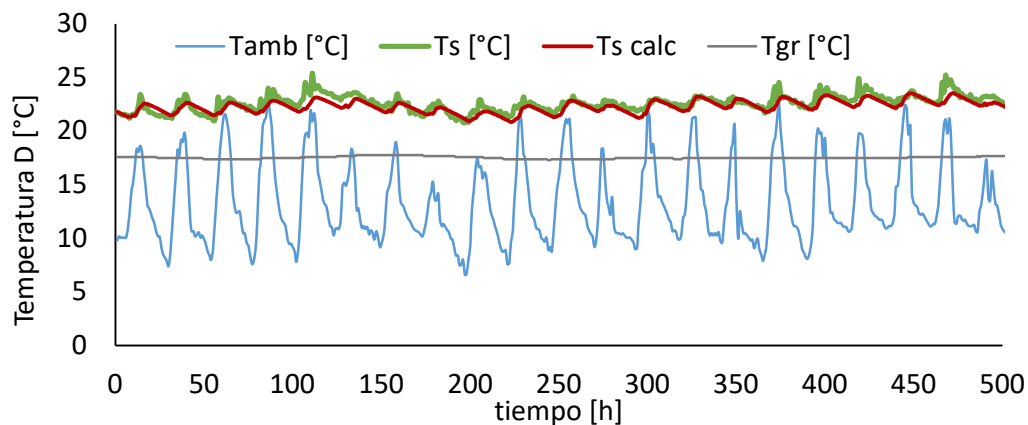
Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario C.



Para el escenario C, las variaciones de la temperatura del slurry fueron de mayor amplitud, por su parte, el modelo fue capaz de reproducir el comportamiento, alcanzando un RMSE de 1.0°C . Lo mismo sucedió para el escenario D, en donde el ajuste del modelo fue notoriamente mejor ($\text{RMSE}=0.65^{\circ}\text{C}$). También, en este caso se nota la diferencia entre la temperatura del suelo y la del reactor, siendo la mayor para los cuatro escenarios (5.1°C).

Figura 9

Temperaturas experimentales y resultado del modelo en escenario D.

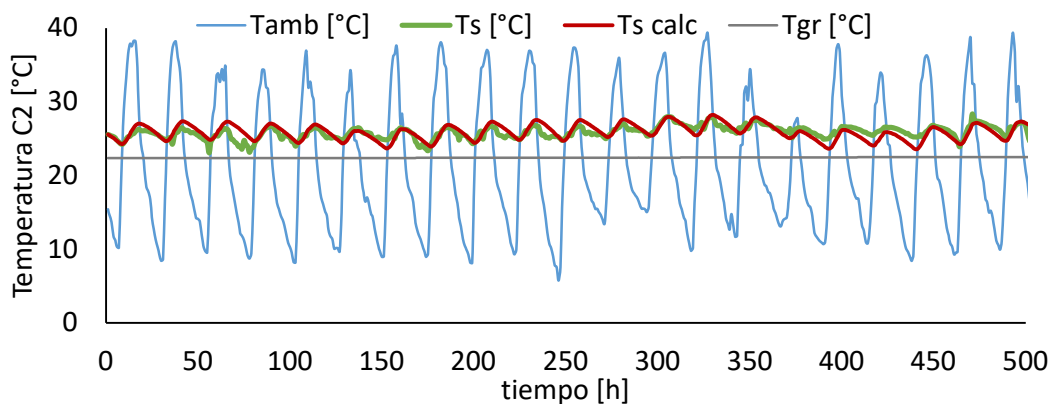


EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Lo anterior implica que el uso de ambas estrategias puede promover ganancias de 5°C en la temperatura del slurry en el volumen de operación. Para la validación del ajuste se usaron datos publicados por Martí-Herrero et al. (2018), en la cual se reprodujeron los valores de temperatura satisfactoriamente, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Temperaturas experimentales y validación del modelo en escenario C2.



A partir de los anteriores resultados se determinaron tres características que describen la dinámica térmica del BDG rural de bajo costo: i) el slurry dentro del BDG ofrece resistencia al cambio de temperatura, tanto para ganar como para perder, ya que es una gran cantidad de masa (1-1000 t) cuya única fuente de calentamiento es el sol, ii) el aire del invernadero y el biogás acumulado en la campana del reactor actúan como aislantes entre el slurry y el ambiente, tanto para ganar como para perder calor y iii) el slurry tiene un 70 – 80% de su área superficial en contacto con el suelo. Como consecuencia, la temperatura del slurry (T_s) tiende a igualar la temperatura del suelo (T_{gr}).

De lo anterior se infiere que, el efecto térmico del diseño bioclimático puede observarse mediante la diferencia de dichas temperaturas ($T_s - T_{gr}$). Los resultados muestran que someter el digestor a la intemperie (diseño A) promueve el equilibrio térmico entre el slurry y el suelo, mientras que, construir un invernadero sobre el reactor (diseño B) permite una ganancia de temperatura menor a los 2°C. Por su parte, implementar únicamente aislantes con el suelo (diseño C) promueve ganancias mayores a 3°C, pero combinar ambas estrategias (diseño D) permite un aumento de 5°C. Lo anterior sugiere que el aislante con el suelo es el factor clave, dado que tiene mayor efecto térmico que el invernadero y no se puede ubicar después de la instalación del digestor.

2.6 Conclusiones

- La dinámica térmica del biodigestor tubular rural puede ser determinada a partir de un modelo simple y con pocos datos de entrada. Esto permite describir cómo funcionará cada estrategia en futuros proyectos de biodigestores.
- Se determinaron coeficientes de transferencia de calor por mecanismo convectivo con valores de 35.9, 18.1, 38.1 y 20.0 $W/m^2 K$ para el aire ambiente, el aire en el invernadero, el biogás y el *slurry*, respectivamente.
- El *slurry* tiene el 70-80% de su superficie en contacto con el suelo, mientras que el resto de su superficie está aislada por el biogás. Por lo tanto, el *slurry* tiende al equilibrio térmico con el suelo.
- En este estudio el invernadero permitió una ganancia de temperatura menor a 2°C respecto del suelo. El aislante permitió una ganancia de 3°C. Ambas estrategias en conjunto permitieron una ganancia mayor a 5°C. Por lo tanto, el aislante con el suelo es el factor calve, dado que tiene mayor efecto térmico que el invernadero y no se puede ubicar después de la instalación del digestor.

3. CAPÍTULO 2: MODELAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DEL BIODIGESTOR TUBULAR RURAL

3.1 Introducción

Los resultados del análisis térmico mostraron que se deben esperar ligeros aumentos de temperatura ($< 5^{\circ}\text{C}$) debido al uso de invernaderos y aislantes con el suelo. Este capítulo se enfocó en la validación de un modelo simplificado que permite establecer la relación entre la condición térmica del slurry y la producción de biogás para digestores de bajo costo.

En 2022, Jaimes-Estévez et al., muestran el proceso de investigación para llegar a la instalación de un digestor anaeróbico de bajo costo. Inicialmente, se evalúa el Potencial de Biometanización (PBM) de una matriz orgánica residual de amplia disponibilidad o gran impacto en la salud del ambiente y la población. Aquellos residuos con PBM competentes se reconocen como sustratos atractivos para ser gestionados y valorizados a través de digestión anaeróbica.

Después, se realiza una etapa intermedia a escala laboratorio en reactores semicontinuos de 6 – 10 L de capacidad. En estos reactores se observa el comportamiento de la digestión anaeróbica bajo diferentes condiciones de carga (VCO) y tiempos de residencia (TRH). Se permiten amplios periodos de seguimiento (2 – 3 TRH) con el fin de observar la posible acumulación de agentes inhibitorios u otros factores como la obstrucción mecánica.

Superadas las etapas anteriores, se lleva a escala doméstica usualmente rural, donde se observa la digestión anaeróbica bajo condiciones reales de campo. Comúnmente, el BDG tubular rural opera con cargas moderadas ($\text{VCO} < 2 \text{ kgSV/m}^3\text{d}$) que han sido probadas a escala laboratorio, en régimen batch o semicontinuo, con lo cual se asegura su estabilidad.

Otra particularidad de la escala doméstica son los altos TRH ($> 30 \text{ d}$), aunque los ensayos discontinuos de PBM suelen estabilizar la materia orgánica en menos de 20 d. Así mismo, se ha mostrado que después del primer año de operación la microbiota del BDG tiene capacidad adaptativa frente a posibles agentes inhibitorios (Jaimes-Estévez et al., 2021).

De lo anterior se sigue que, si el BDG opera en estado estable, es probable que transforme toda la materia orgánica susceptible a biometanización y, por lo tanto, extraiga todo el metano posible del sustrato. En todo caso, la producción de biogás en escala rural queda circunscrita por la cinética de la reacción, el volumen de operación (V_{op}), la velocidad de carga (VCO), el tiempo de residencia (TRH) y la temperatura de operación.

3.2 Estado del arte

Para predecir la producción de biogás (\dot{V}_b) se han desarrollado diversos modelos para diferentes escenarios. En 2002, la IWA publica el modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No. 1), hasta la fecha el sistema de ecuaciones diferenciales y aritméticas más completo que definen los procesos bioquímicos de la digestión anaeróbica.

El modelo ADM1 resulta útil para predecir inhibiciones de un estado inestable, pero requiere información especializada sobre la composición del alimento. Este modelo incorpora las etapas del proceso de digestión anaeróbica: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, cada una con su propio sistema de ecuaciones, lo que le permite simular de manera precisa las interacciones bioquímicas y fisicoquímicas que ocurren en un digestor.

Aunque esta precisión es extremadamente valiosa para la optimización de procesos en plantas de biogás a gran escala, la complejidad del ADM1 implica un mayor requerimiento de datos y recursos computacionales, lo que puede limitar su aplicabilidad en situaciones donde la simplicidad es esencial (Chen et al., 2016).

Con este fin, en 2014, Terradas-III et al., concatenaron las cinéticas de Chen & Hashimoto (1979) con el modelo térmico de Perrigault et al. (2012), para de estimar el rendimiento de un BDG de cúpula fija a partir del Potencial de Biometanización (PBM) y la concentración de Sólidos Volátiles (SV) del alimento. Sin embargo, la baja presión de almacenamiento del biogás afectó la precisión del modelamiento a una periodicidad horaria.

En 2016, Kaffle & Chen estudiaron la cinética de la digestión anaeróbica en régimen batch, con el fin de estimar la producción de biogás de diferentes sustratos, encontrando que las cinéticas de primer orden permiten un ajuste de gran precisión. Estos estudios coinciden con los de Safley & Westerman (1990), quienes advierten que la cinética de primer orden de la digestión anaeróbica sigue el modelo de Arrhenius respecto de la temperatura.

El modelo de primer orden y de Arrhenius destacan por su simplicidad y facilidad de uso. Debido a su estructura sencilla, requieren menos datos y recursos computacionales, lo que lo hace ideal para estudios preliminares y aplicaciones donde se necesita una estimación rápida para la toma de decisiones. Aunque resultan modelos simplificados, estas cinéticas no se han utilizado para evaluar el efecto del diseño bioclimático en la producción de biogás.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

3.3 Marco teórico

Una estrategia para relacionar los parámetros previamente descritos con la producción de biogás consiste en asumir que el BDG semicontinuo está compuesto por una serie de reactores batch de 1 día de residencia. De esta manera, el número total de reactores batch es igual al número de días del TRH. Esto se ilustra en la Figura 11.

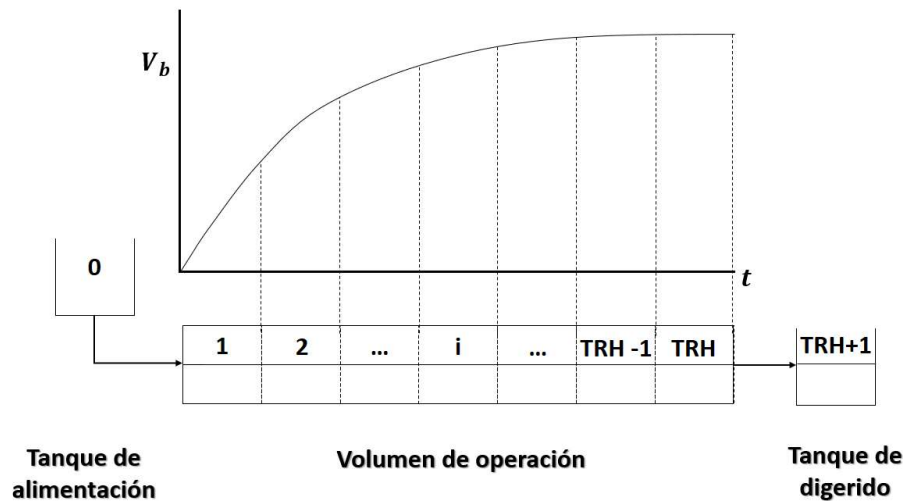


Figura 11. Cinética del BDG semicontinuo

Desde esta perspectiva, la producción diaria de un BDG semicontinuo, en estado estable, puede estimarse como la cantidad de biogás que un reactor batch puede acumular, en un periodo igual al TRH. El modelo de producción de biogás se fundamenta en cinéticas de primer orden, de la siguiente manera:

$$\dot{V}_b = V_{op} * VCO * PBM [1 - \exp(-k TRH)] \quad (ec-13)$$

$$k = k_o * \exp\left(\left(\frac{E_o}{R}\right) * \left(\frac{T_s - T_o}{T_s * T_o}\right)\right) \quad (ec-14)$$

Donde $T_o = 299.65 K = 36.5^\circ C$

$$E_o = 63,492.2 \text{ kJ/kmol}$$

$k_o = \{0.084; 0.1196; 0.0676\} d^{-1}$ para estiércol bovino, porcino y equino, respectivamente

R: Constante de los gases ideales kJ/kmol.K

3.4 Metodología

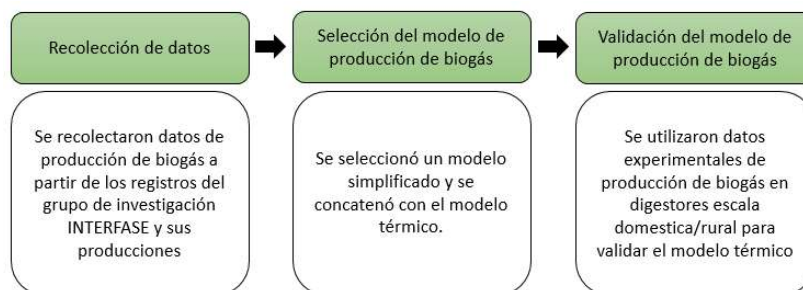
Con el fin de validar las ecuaciones de rendimiento de biogás, se analizaron los registros experimentales de Velocidad de producción de biogás (\dot{V}_b), Velocidad de Carga Orgánica

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

(*VCO*) y Tiempo de Retención Hidráulico (*TRH*) en los escenarios A, C, y D. Estos datos fueron recolectados por las investigaciones de Jaimes-Estévez et al., (2022) y Muñoz et al., (2022). La temperatura ambiente y la irradiancia se obtuvieron de la base datos POWER (NASA). En estas investigaciones se utilizaron gasómetros HUMCAR® para determinar el volumen de gas producido.

Figura 12

Metodología segundo capítulo



En los escenarios A y C se trataron excretas bovinas, en el escenario D se trató excretas porcinas, obteniendo ventanas de observación de 150 h, 150 h y 600 h para el escenario A, C y D, respectivamente. El biogás se reportó en base seca y en condiciones normales. Se usó el modelo cinético explicado por Kaffle & Chen (2016) y los parámetros del modelo de Arrhenius propuestos por Safley & Westerman (1990).

3.5 Resultados

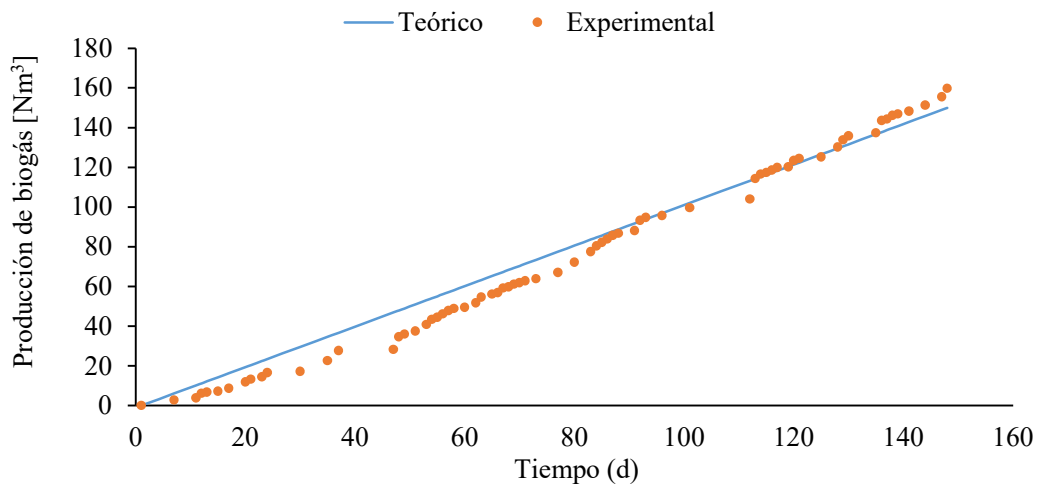
En la Tabla 4 se presentan los datos operacionales con los cuales se validó el modelo de primer orden. Los escenarios A y C son sistemas con reactores de igual tamaño, que operan en condiciones de carga similares y que fueron instalados en la misma zona del municipio de Cáchira, por lo que están bajo las mismas condiciones ambientales.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Tabla 4*Datos operacionales de los escenarios*

Escenario	Velocidad de Carga Orgánica (VCO) [$kg_{SV}/m_{op}^3 d$]	Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) [d]	Volumen de operación (V_{op}) [m_{op}^3]	Tipo de excreta
A	0.6	75	5.2	Bovina
C	0.6	75	5.2	Bovina
	1.0			
D	3.0	15	28	Porcina
	2.5			

Particularmente, el escenario D se llevaron registros de tres dinámicas de alimentación diferentes. La velocidad de carga orgánica (VCO) cambió en tres ocasiones debido a factores como la inclusión o salida de lotes de porcinos y la demanda de los mismos (Muñoz et al., 2022). El seguimiento de la producción de biogás del escenario A se presenta en la figura 13, la línea sólida azul muestra la predicción del modelo y los puntos naranjas son los datos experimentales recolectados.

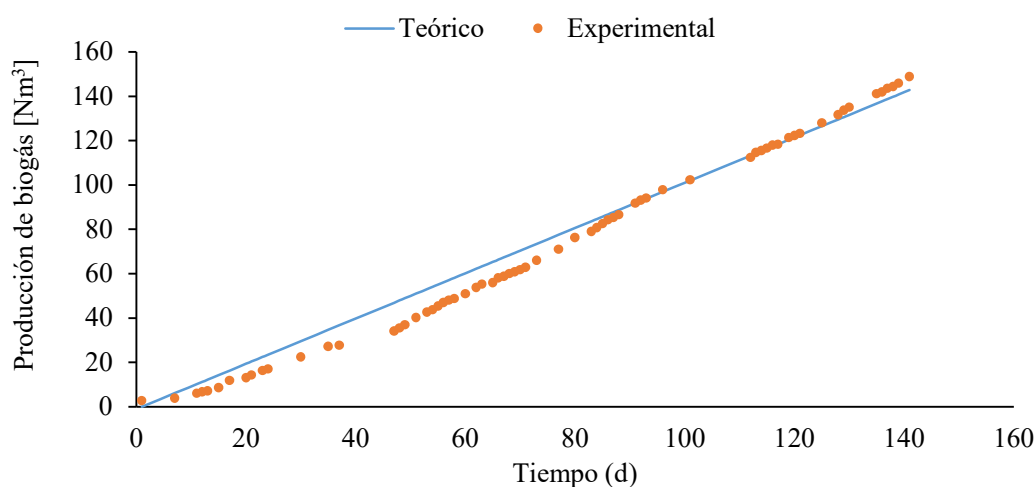
Figura 13*Producción de biogás teórica y experimental escenario A.*

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Respecto de su comportamiento, aunque el modelo predice acertadamente la tendencia central, muestra una desviación en especial en los primeros días de seguimiento. Esta diferencia entre el valor experimental y el teórico se explica debido a que los registros corresponden al arranque de los biodigestores. Lo anterior implica un periodo lag que no predice el modelo, sin embargo, una vez superan el primer TRH los valores experimentales son cercanos a los predichos. El escenario C muestra una tendencia similar, como lo muestra la figura 14.

Figura 14

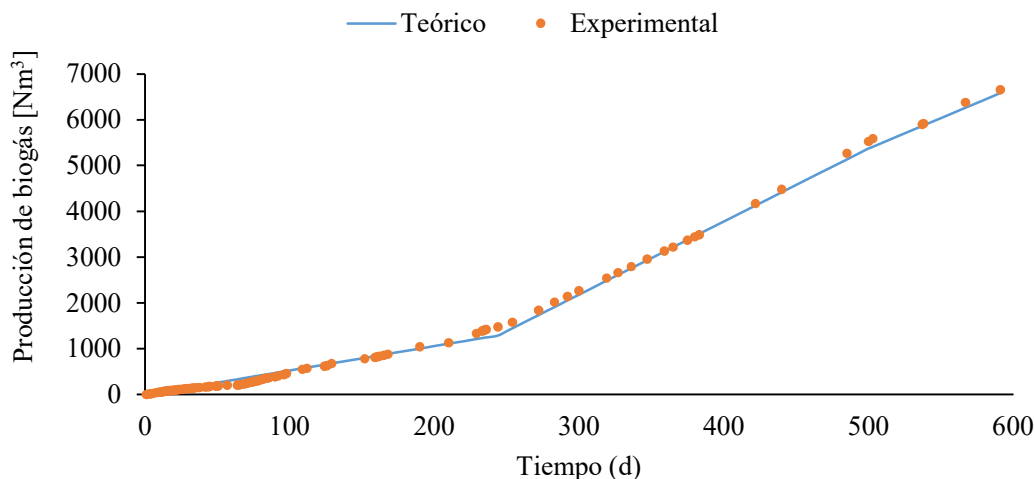
Producción de biogás teórica y experimental escenario C.



Debido a las dinámicas de la escala rural el flujo de información puede verse afectado por diversos factores como la falta de cobertura de red o la renovación de equipos, es por esto que los valores se reportan con variaciones en su frecuencia de medición. En cuanto al escenario D, se identificaron diferentes momentos en los que variaron las condiciones de alimentación, debido a cambios en el número de individuos del sistema porcino que produce las excretas que constituyen su alimento. Aun así, el modelo se comportó de manera sobresaliente, esto puede verse en la figura 15.

Figura 15

Producción de biogás teórica y experimental escenario D.



El modelo de primer orden demuestra su valor por su simplicidad y facilidad de uso. Permite hacer estimaciones rápidas y confiables de la producción de biogás, sin necesitar muchos datos ni grandes recursos computacionales. Esto lo hace perfecto para estudios iniciales y aplicaciones industriales donde la rapidez y la eficiencia son más relevantes. Su diseño sencillo permite adaptarlo fácilmente a diferentes situaciones sin complicaciones, lo que lo convierte en una herramienta muy útil para tomar decisiones en tiempo real, especialmente para aquellos con recursos limitados.

3.6 Conclusiones

- Se registraron tasas de producción de biogás experimentales de 6.8, 6.6 y 7.1 $\text{Nm}^3/\text{m}^3_{\text{opd}}$ y errores cuadráticos medios de 0.010, 0.009 y 0.005 $\text{Nm}^3/\text{m}^3_{\text{opd}}$ para el escenario A, C y D, respectivamente.
- Se validaron las ecuaciones de un modelo simplificado de producción de biogás a partir de resultados experimentales en tres escenarios experimentales. Se encontró que al modelo le cuesta representar fases *lag* asociadas con el arranque del biodigestor, aun así, tiene un ajuste aceptable para la simplificación que ofrece.
- Se demostró que el modelo de primer orden fue capaz de adaptarse a los diferentes escenarios sin complicaciones, lo que lo convierte en una herramienta de gran utilidad para evaluar el uso de aislante o invernaderos.

4. CAPÍTULO 3: COMPARACIÓN DEL AISLANTE Y EL INVERNADERO, ANÁLISIS TÉRMICO Y DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

4.1 Introducción

En los capítulos anteriores se han completado, simplificado y validado modelos de transferencia de calor y producción de biogás. En este capítulo se usan estas herramientas matemáticas para comparar las estrategias del aislante y el invernadero respecto de la condición térmica y de rendimiento del reactor, simulando escenarios con las mismas condiciones ambientales, operacionales y de diseño.

La simulación y el modelado computacional se han convertido en herramientas indispensables en la investigación científica y el desarrollo tecnológico, especialmente cuando realizar experimentos directos no es posible debido a limitaciones económicas, logísticas o de seguridad. Estos métodos permiten a los investigadores explorar y entender sistemas complejos, anticipando cómo se comportarían en diferentes situaciones sin tener que llevar a cabo pruebas en el mundo sensible. (Fujimoto, 2017).

Además, la posibilidad de realizar múltiples pruebas en un entorno virtual ayuda a optimizar diseños, reducir costos y acelerar el desarrollo de soluciones tecnológicas. La simulación no solo permite validar teorías y modelos con mayor precisión, sino que también abre nuevas puertas para la innovación, al permitir la exploración de escenarios hipotéticos y la predicción de resultados en un entorno seguro y controlado (Rajendran, 2014).

Particularmente, en el estudio de los biodigestores rurales los escenarios experimentales están sujetos a variaciones en la alimentación; debido a la dinámica operacional se presentan fluctuaciones tanto en la cantidad como en la composición del alimento. Adicionalmente, las condiciones ambientales de irradiancia, temperatura del aire y del suelo son específicas para cada sistema de biodigestión. Si bien los fenómenos y las ecuaciones que los describen pueden validarse en estos escenarios, la comparación del invernadero y aislante en campo requiere de varios reactores con diferentes diseños en la misma ubicación, alimentándose con el mismo sustrato, con un mismo tiempo de residencia.

Estos escenarios son difíciles de establecer en campo, por lo que en esta situación es necesario simular para obtener la información requerida y evaluar los diseños a priori de su construcción. Para esto se tomaron ubicaciones arbitrarias que representaran diferentes

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

condiciones ambientales y se simuló la instalación de los escenarios ABCD, estandarizando la velocidad de carga orgánica, el volumen de operación y el tiempo de residencia.

4.2 Estado del arte

La digestión anaeróbica ha sido ampliamente adoptada en entornos rurales como una tecnología sostenible para la gestión de residuos orgánicos y la producción de biogás. Sin embargo, la implementación efectiva de la digestión anaeróbica en áreas rurales presenta desafíos específicos debido a las limitaciones de escala, la variabilidad de los sustratos y la necesidad de adaptar los modelos de simulación para condiciones no industriales.

La principal dificultad para la simulación es la complejidad inherente del proceso, que incluye múltiples etapas bioquímicas, cada una con su propio conjunto de reacciones. Algunos sistemas de ecuaciones incluyen variables como el pH en estados inestables (Campos & Flotats, 2003). Por esto se ha intentado simplificar a través de diferentes estrategias, por ejemplo, el uso de algoritmos estocásticos (Palanichamy & Palani, 2014).

En la escala rural, el modelamiento y simulación de la digestión anaeróbica ha sido un área de investigación clave para optimizar el diseño y operación de los digestores. Los modelos matemáticos, como el ADM1, han sido fundamentales para comprender los procesos bioquímicos que ocurren dentro del digestor (Rajendran et al., 2014). Sin embargo, el uso de estos modelos en entornos rurales requiere ajustes significativos debido a las dinámicas operativas y la realidad de la pequeña escala.

Un enfoque emergente en el modelamiento de la digestión anaeróbica a escala rural es la aplicación de modelos de primer orden para simplificar la simulación de estos procesos. Estos modelos son menos complejos, pero permiten capturar las dinámicas clave del proceso anaeróbico. Al centrarse en un número reducido de parámetros críticos, los modelos de primer orden facilitan el diseño y la operación de digestores en comunidades rurales, donde la simplicidad y la facilidad de uso son esenciales (ALI et al., 2018).

De esta manera, el avance en el modelamiento y la simulación de la digestión anaeróbica en entornos rurales está permitiendo una mayor adopción de esta tecnología en áreas donde los recursos son limitados. La transición hacia modelos de primer orden representa una evolución lógica en este campo, proporcionando una herramienta práctica y accesible para optimizar el rendimiento de los digestores a pequeña escala. Con el apoyo de modelos

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

adaptados a las condiciones rurales, es posible mejorar la sostenibilidad y eficiencia de estos sistemas, contribuyendo significativamente al desarrollo rural sostenible.

4.3 Marco teórico

Para este capítulo se recogen todas las suposiciones teóricas de los anteriores capítulos. Se asumen que los valores de conductividad térmica y coeficientes de transferencia de calor ajustados en el capítulo 1 y las ecuaciones de producción de biogás validadas en el capítulo 2. Por lo tanto, la dinámica térmica se describe por el modelo de Vilms et al., (2020) y la dinámica de rendimiento de biogás se describe por el modelo de primer orden y de Arrhenius. Asimismo, se asume que el efecto del invernadero y el aislante con el suelo sobre la producción de biogás puede observarse en escenarios ABCD expuestos a las mismas condiciones ambientales y operados con los mismos parámetros. La velocidad de carga orgánica (VCO) se determinó a partir del tiempo de retención hidráulico (TRH) y la relación excreta/agua. A su vez, el TRH quedó en función de la temperatura ambiente media.

4.4 Metodología

La metodología del presente capítulo se resume en la figura 16. Se obtuvieron valores de irradiancia y temperatura ambiente para dos ubicaciones diferentes a través de la base de datos POWER (NASA). Se obtuvieron datos para el año 2020.

Figura 16

Metodología tercer capítulo.



Para todos los escenarios se estandarizó el volumen de operación en 28 m³ y se evaluó la alimentación compuesta por excretas porcinas y agua en relación 1:4. Para cada ubicación

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

se ajustó el TRH en función de la temperatura ambiente media según la (ec-1), como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5

Ubicaciones usadas para obtención de datos ambientales

Ciudad	Ubicación	Temperatura ambiente media [°C]	TRH [d]
Bogotá	N: 4°36'35"	19 ± 4	64
	O: 74°04'54"		
Barrancabermeja	N: 7°03'55"	27 ± 3	41
	O: 73°51'17"		

Se compararon los cuatro escenarios ABCD para las dos ubicaciones y se determinó el efecto de las estrategias invernadero y aislante sobre la temperatura de operación y la producción de biogás.

Respecto de la ganancia por producción de biogás, esta se determinó para un contenido de metano del 60% a partir de las ecuaciones reportadas por Castro et al., (2017) para el poder calórico inferior (17.667 kJ/kg) y el precio promedio nacional del gas natural reportado por el Ministerio de Minas y Energía 25.8 COP/MJ.

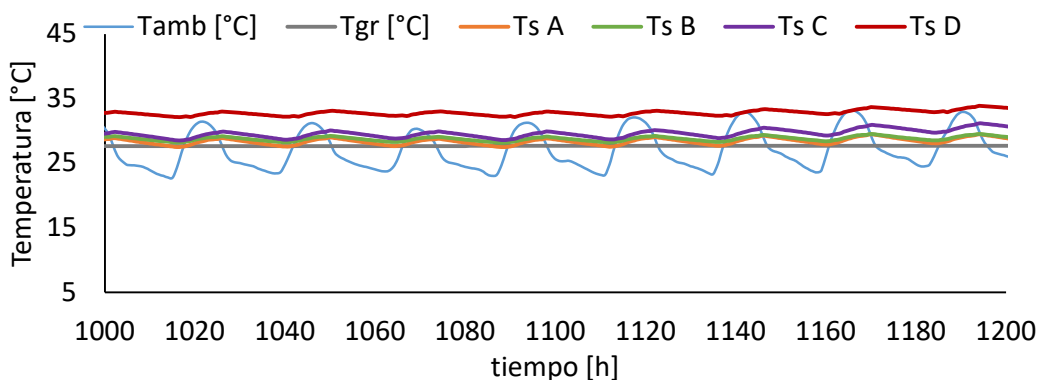
4.5 Resultados

En la figura 17 se presentan los resultados de simular la instalación de los escenarios ABCD en la ciudad de Barrancabermeja; se muestra una ventana de 200 horas representativas a toda la serie de datos. El escenario D, con invernadero y aislante con el suelo, obtuvo el mejor resultado.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Figura 17

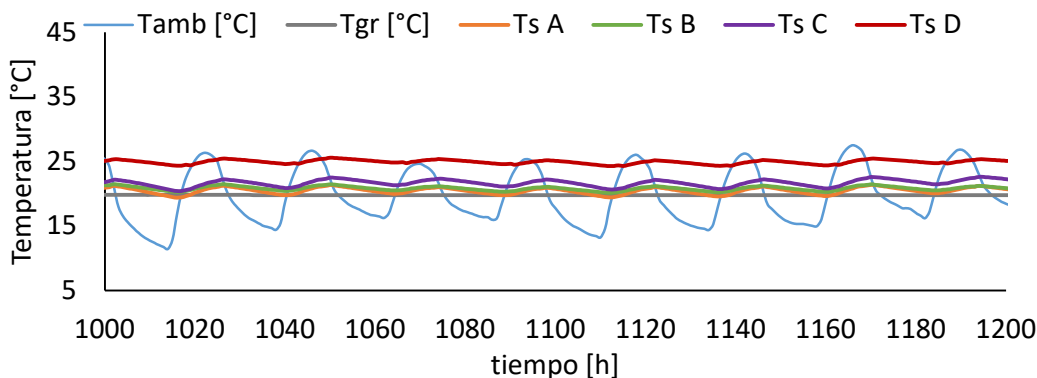
Temperatura del slurry para los escenarios ABCD en Barrancabermeja.



De la anterior gráfica se nota que los escenarios A y B, sin aislante con el suelo, tienen un desempeño menor a los escenarios C y D, que sí estaban aislados del suelo, lo que ratifica su importancia. Sin embargo, los efectos térmicos siguen estando en el orden de los 5°C. Un comportamiento similar se encontró en la segunda ubicación, que se muestra en la figura 18.

Figura 18

Temperatura del slurry para los escenarios ABCD en Bogotá.

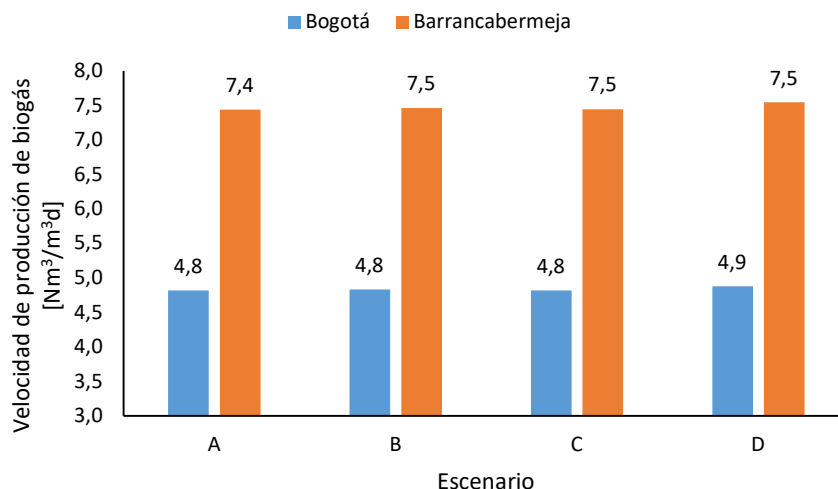


Para el caso de Bogotá, se replicaron los comportamientos de los escenarios ABCD, respecto del caso de Barrancabermeja. Los escenarios A y B igualaron sus temperaturas, los escenarios C y D mostraron capacidad de aumentar la temperatura de operación. Sin embargo, estas diferencias en temperatura no afectaron la tasa de producción de biogás, esto se puede ver en la figura 19.

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Figura 19

Producción de biogás para los escenarios ABCD.



Se encontraron producciones de biogás de 4.8 y 7.5 Nm³/m³opd para el clima frío y cálido, respectivamente. La diferencia entre la producción de biogás de las dos ubicaciones puede explicarse debido a que las temperaturas ambientales bajas (<20°C) provocan que el TRH recomendado sea grande (>2 meses), lo que reduce la cantidad de residuos que se pueden tratar por unidad de volumen de operación. Para el caso del clima cálido se trató VCO de 1 kgSV/ m³opd mientras que en clima frío solo se trató 0.6 kgSV/m³opd. Esto beneficia la producción de biogás en ubicaciones con climas cálidos, ya que se pueden tratar VCO mayores en comparación con los climas fríos.

La autogestión energética rural tiene un papel importante en la economía campesina, ya que cada metro cúbico de biogás aporta 21.4 MJ. Para el 2024 se ha reportado un precio promedio de 25.8 COP/MJ en términos de energía como calor generado por la combustión de gases, este precio tiene en cuenta un 47.5% por suministro, 22.9% por transporte y 29.6% por distribución del combustible. Para los escenarios ABCD evaluados en clima frío se determinó un ahorro en el orden de los 2700 COP/m³opd, mientras que para los escenarios en clima cálido se estimó en 4100 COP/m³opd.

4.6 Conclusiones

- El modelamiento matemático de la transferencia de calor y la producción de biogás en digestión anaeróbica resulta útil para observar el efecto del diseño sobre la temperatura de operación y el rendimiento del reactor.
- Los escenarios D tienen la mayor capacidad de colección de calor, esto es, permiten al slurry estar a una mayor diferencia con su pozo térmico que el resto de los escenarios. Este efecto aumenta en tanto el clima sea cálido y disminuye en tanto sea clima frío.
- El escenario C mostró que el aislamiento con el suelo provoca pequeños aumentos de temperatura en el volumen de operación, pero también expone al *slurry* al ambiente. Por lo que en ambiente muy fríos no sería recomendable.
- Instalar un invernadero sobre el digestor ayuda a la protección física y al cuidado de la geomembrana del reactor, sin embargo, por sí solo no provoca el suficiente efecto térmico para aumentar sensiblemente el rendimiento de biogás.
- La cantidad de energía reemplazada mediante biogás permite un ahorro económico de 2700 y 4100 COP/m³_{opd} para climas fríos y cálidos, respectivamente. Esto supone que los sistemas de biodigestión anaeróbica tienen la capacidad de desplazar el uso de combustibles fósiles y gestionar sosteniblemente la demanda energética rural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). *A brief history of anaerobic digestion and "biogas"*. Biogas energy (pp. 11-23). Springer, New York, NY.
- Akindolire, Rama, H., & Roopnarain, A. (2022). *Psychrophilic anaerobic digestion: A critical evaluation of microorganisms and enzymes to drive the process*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 161, 112394. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112394>
- ALI, M. M., DIA, N., BILAL, B., & NDONGO, M. (2018). Theoretical models for prediction of methane production from anaerobic digestion: A critical review. International Journal of Physical Sciences, 13(13), 206-216. <https://doi.org/10.5897/IJPS2018.4740>
- Campos, E., & Flotats, X. (2003). Dynamic simulation of pH in anaerobic processes. Applied Biochemistry and Biotechnology, 109, 63-76. <https://doi.org/10.1385/ABAB:109:1-3:63>.
- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Diaz, 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
- Chen, Y. R.; Hashimoto, A. G. *Kinetics of methane fermentation*. Biotechnol. Bioeng. Symp.1979, 8, 269-282.
- DANE, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2018). *Resultados censo nacional de población y vivienda 2018*. República de Colombia. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Donoso-Bravo, A. (2020). *Fundamentos de modelación de procesos y su utilidad en digestión anaerobia* [Webinar]. Red de Biodigestores para Latino América y el Caribe RedBioLac. <https://redbiolac.org/home>
- Ferrer, Y., & Pérez, H. (2010). *Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 43(1), 9-20.
- Fujimoto R. M., "Parallel discrete event simulation: The making of a field," 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, USA, 2017, pp. 262-291, doi: 10.1109/WSC.2017.8247793.
- Garfí, M., Ferrer-Martí, L., Perez, I., Flotats, X., & Ferrer, I. (2011). *Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude*. Ecological Engineering, 37(12), 2066-2070. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.018>
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2022). *Mapa de temperatura ambiente media anual*. República de Colombia. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima>
- 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

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Anaerobic Digestion (DAAL) Thirteenth Edition, Simposio llevado a cabo el mes de octubre en Medellín, Colombia.

- Jaimes-Estévez, J.; Zafra, G.; Martí-Herrero, J.; Pelaz, G.; Morán, A.; Puentes, A.; Gomez, C.; Castro, L.d.P.; Escalante, H., (2021). *Psychrophilic Full Scale Tubular Digester Operating over Eight Years: Complete Performance Evaluation and Microbiological Population*. *Energies* 2021, 14, 151. <https://doi.org/10.3390/en14010151>
- Jaimes-Estévez, J., Mercado, E. V., Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Martí-Herrero, J., Escalante, H., & Castro, L. (2022). *From laboratory to farm-scale psychrophilic anaerobic co-digestion of cheese whey and cattle manure*. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101168-. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101168>
- Jaramillo, J. G., Rodríguez, P., Jaimes-Estévez, J., Castro, L., y Escalante, H. (2021). *Efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico: caso de estudio dos digestores operando bajo condiciones psicrófilicas*. *RedBioLAC*, 5, 4-8.
- Kafle, G. K., & Chen, L. (2016). *Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models*. *Waste management*, 48, 492-502
- Kashyap, D. R., Dadhich, K. S., & Sharma, S. K. (2003). *Biomethanation under psychrophilic conditions: A review*. *Bioresource Technology*, 87(2), 147-153. [Doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00205-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00205-5).
- Luo, J., Zhang, Q., Zhao, J., Wu, Y., Wu, L., Li, H., Tang, M., Sun, Y., Guo, W., Feng, Q., Cao, J., & Wang, D. (2020). *Potential influences of exogenous pollutants occurred in waste activated sludge on anaerobic digestion: A review*. *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 383). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121176>
- Ministerio de Ambiente de Colombia. (2021). *Producción de biogás del sector agropecuario colombiano*. <http://mapa.epizy.com/pym.html#5/9.257/-73.850>
- NASA, National Aeronautics and Space Administration (2022). *Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER)*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Palanichamy, J., & Palani, S. (2014). Simulation of anaerobic digestion processes using stochastic algorithm. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12. <https://doi.org/10.1186/s40201-014-0121-7>.
- 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*, 124, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>
- Rajendran, K., Kankanala, H. R., Lundin, M., & Taherzadeh, M. J. (2014). A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. *Bioresource Technology*, 168, 7–13. [doi:10.1016/j.biortech.2014.01.05](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.05)
- Resolución 549 de 2015. *Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la parte 2, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones - Anexo No 2. Mapa de Clasificaciones del Clima en Colombia según la*

EVALUACIÓN DEL DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN BIODIGESTORES

Temperatura y la Humedad Relativa y listado de municipios. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. República de Colombia.

- Safley Jr, L. M., & Westerman, P. W. (1990). Psychrophilic anaerobic digestion of animal manure: proposed design methodology. *Biological wastes*, 34(2), 133-148
- Tavera-Ruiz, C., Martí-Herrero, J., Mendieta, O., Jaimes-Estévez, J., Gauthier-Maradei, P., Azimov, U., Escalante, H. & Castro, L. (2023). Current understanding and perspectives on anaerobic digestion in developing countries: Colombia case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113097.
- Terradas-Ill, G., Pham, C. H., Triolo, J. M., Martí-Herrero, J., & Sommer, S. G. (2014). *Thermic model to predict biogas production in unheated fixed-dome digesters buried in the ground.* *Environmental science & technology*, 48(6), 3253-3262.
- UPRA, Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (2022). *Mapa Frontera Agrícola Nacional.* Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (Sipra). República de Colombia. <https://sipra.upra.gov.co/nacional>
- Vilms Pedersen, Martí-Herrero, J., Singh, A. ., Sommer, S. ., & Hafner, S. . (2020). Management and design of biogas digesters: A non-calibrated heat transfer model. *Bioresource Technology*, 296, 122264–122264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122264>
- Weatherford, V. C., & Zhai, Z. J. (2015). *Affordable solar-assisted biogas digesters for cold climates: Experiment, model, verification and analysis.* *Applied Energy*, 146, 209-216.
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan, T. R., Kohli, S., & Rana, V. (2004). *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - A review.* *Bioresource Technology* (Vol. 95, Issue 1, pp. 1–10). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.010>