

## EFFECTO DE LAS VARIABLES OPERATIVAS DE UN BIODIGESTOR SEMI-CONTINUO DURANTE LA FASE DE ARRANQUE

### EFFECT OF OPERATIONAL VARIABLES OF A SEMI-CONTINUOUS BIODIGESTER DURING THE START-UP PHASE

Camarena-Martinez P.J.<sup>1</sup>, Tutuli-Ávila S.<sup>2</sup>, Medina-Herrera N.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Francisco Villa s/n Col. Ex-Hacienda El Canadá, 66050, Gral. Escobedo N.L.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Universidad s/n Col. Ciudad Universitaria, 66455, San Nicolás de los Garza, N.L.

\*nancy.medinahr@uanl.edu.mx

#### Artículo Científico

Publicado: 31 de julio 2025

#### RESUMEN

La digestión anaerobia (DA) es una opción viable para el manejo y aprovechamiento de residuos de frutas y verduras (RFV). Sin embargo, la inherente tendencia de los RFV a acidificar el medio puede inhibir el crecimiento de microorganismos. Parámetros como el pH, temperatura, tiempo de retención hidráulica (TRH) y la tasa de carga orgánica (TCO) influyen de manera significativa en la estabilidad y eficiencia de la DA. La selección adecuada de estos parámetros de operación asegura el balance de nutrientes, la estabilidad de las comunidades microbiológicas y maximiza la producción de biogás. Este estudio analiza el impacto del TRH y la TCO durante la fase de arranque de un biodigestor semicontinuo. Se realizó un monitoreo continuo del pH, temperatura, concentración de gas metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) con el fin de evaluar su relación con la producción de

biogás y garantizar la estabilidad del sistema durante el arranque del biodigestor. A partir del monitoreo en tiempo real del pH, se establecieron límites de pH operativos y se reguló el TRH y la TCO para prevenir posibles fallos en el sistema. Se observó una mayor estabilidad del sistema con un TRH de 60 días y una TCO de 1.706 g SV L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> a 27°C. Estos valores corresponden con la mayor concentración de CH<sub>4</sub> de 9909.33 PPM. **Palabras clave:** digestión anaerobia, monitoreo, pH.

#### ABSTRACT

The anaerobic digestion represents a viable option for the management and utilization of fruit and vegetable waste (RFV). However, the inherent tendency of RFV to acidify the medium can inhibit microbial growth. Parameters such as pH, temperature, hydraulic retention time (TRH) and organic loading rate (TCO) significantly influence the stability and

efficiency of anaerobic digestion. Proper selection of these operating parameters ensures nutrient balance, stability of microbiological communities and maximizes biogas production. This study analyzed the impact of HRT and OLR during the start-up phase of a semi-continuous biodigester. Continuous monitoring of pH, temperature, methane gas and carbon dioxide concentration was carried out to assess their relationship with biogas production and to ensure system stability. From the real-time monitoring of pH, operational pH limits were set, and HRT and OLR were regulated to prevent possible system failures. A higher system stability was observed with an HRT of 60 days and an OLR of  $1.706 \text{ g SV L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  at  $27^\circ\text{C}$ . These values correspond to the highest  $\text{CH}_4$  concentration of 9909.33 PPM.

**Key words:** anaerobic digestion, monitoring, pH.

## INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico conformado por cuatro etapas secuenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada etapa ocurre en la presencia de consorcios específicos de microorganismos [1]. El principal producto de la DA es el biogás, el cual se compone por diversos gases incluyendo el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}_2$ . El biogás es una fuente de energía renovable y se considera una alternativa a los combustibles fósiles. El biogás puede ser utilizado en su forma cruda o purificado y sus aplicaciones más comunes son la generación de calor

y electricidad [2 y 3]. En la DA se utilizan diversos sustratos para la generación de biogás y biofertilizante, incluyendo plantas acuáticas, residuos forestales y agroindustriales, residuos de pesca, residuos de comida y residuos de frutas y verduras (RFV). Los RFV son aprovechados para la producción de biogás y biofertilizante de alta calidad. Sin embargo, su uso presenta complicaciones debido a la acidificación causada por los ácidos grasos volátiles (AGV), resultado de su alto contenido de azúcares y sólidos volátiles. Esta acidificación inhibe las tasas de crecimiento de los microorganismos metanógenos [4, 5 y 6].

Los RFV se emplean comúnmente en esquemas de co-digestión junto con sustratos complementarios, con el objetivo de lograr una sinergia mediante el equilibrio de nutrientes y la dilución de compuestos tóxicos o inhibidores. Esta combinación de sustratos permite prevenir la acumulación excesiva de AGV y mejora la capacidad de amortiguamiento del sistema, incluso bajo condiciones de alta TCO [7]. En particular, la co-digestión de estiércol de vaca (EV) con residuos de origen vegetal ha demostrado un efecto positivo sobre la alcalinidad del sistema, ayudando a estabilizar el pH y promoviendo condiciones más favorables para la actividad microbiana [8]. Además, la co-digestión mejora los rendimientos de metano en comparación con la mono-digestión, contribuye a una mayor calidad del digestato y promueve

prácticas sustentables de gestión de residuos [9 y 10].

Durante el proceso de la DA, los microorganismos son altamente sensibles a los cambios ambientales externos, lo que puede llevar a desbalances en el proceso de digestión y, finalmente, causar el fallo del biodigestor [11]. Los parámetros críticos en la DA incluyen la comunidad microbiológica, las características del sustrato, relación carbono-nitrógeno, pH, temperatura, TCO, TRH, AGV, amonio y metales ligeros y pesados [12]. Cada uno de estos factores juegan un rol particular en la eficiencia y estabilidad del sistema.

La temperatura afecta las tasas de descomposición de los sustratos en la fase de hidrólisis y metanogénesis, así como el equilibrio termodinámico de las reacciones bioquímicas y los procesos cinéticos. Además, influye en el crecimiento, la diversidad y la actividad metabólica de los microorganismos, así como en las propiedades de sedimentación, las tasas de transferencia de gases y en el rendimiento en la producción de biogás [12 y 13]. Las condiciones de temperatura en la DA, son clasificadas en tres categorías: psicrófilas (menos de 10 °C), mesófilas (20–45 °C, con un óptimo en 35 °C) y termófilas (más de 50 °C, con un óptimo en 55 °C) [14]. En las temperaturas mesófilas, alrededor de 35 °C, se observa una mayor diversidad microbiana, lo que contribuye a mayor estabilidad del proceso de la DA y mayor producción de biogás. En contraste,

aunque las temperaturas termófilas pueden acelerar las reacciones, también incrementan el riesgo de acumulación de AGV lo que puede derivar en la inhibición del proceso [15 y 16].

El TRH indica el tiempo promedio que la fase líquida permanece en el biodigestor y se calcula siguiendo la Ecuación (1):

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

Donde  $V$  es el volumen del biodigestor (L) y  $Q$  es el caudal de entrada de la alimentación (L día<sup>-1</sup>). En la operación los TRH cortos corresponden a grandes volúmenes de alimentación, que a su vez se asocian a acidificación por AGV y a la pérdida de microorganismos debido al lavado del biodigestor. En contraste, los TRH largos están asociados con mayores costos operativos [2 y 17]. El TRH influye en la diversidad y actividad microbiológica en la DA, ya que determina el tiempo disponible para que los microorganismos degraden la materia orgánica. Las variaciones en el TRH afectan significativamente la estructura de las comunidades bacterianas, observándose cambios notables en los filos dominantes. En condiciones de temperatura controlada los valores óptimos de TRH, rondan entre 35–40 días en condiciones mesofílicas y 15 días en condiciones termofílicas, favorecen poblaciones microbianas estables y una producción eficiente de biogás [18 y 19].

La TCO establece la cantidad de materia biodegradable presente en el

biodigestor, y se expresa siguiendo la Ecuación (2):

$$TCO = \frac{C_{sv}}{TRH} \quad (2)$$

Donde  $C_{sv}$  es la concentración de sólidos volátiles. Un desbalance en la TCO se asocia a fallos en el proceso, ya que favorece la formación de compuestos inhibitorios, provoca desbalances de nutrientes, acumulación de ácidos y genera estrés en los microorganismos [13]. De acuerdo con Wu et al [20], el 37% de la inestabilidad en la DA es causada por una sobrecarga gradual de la alimentación que llega a sobrepasar la capacidad de procesamiento de la DA, lo cual genera una descompensación entre los organismos productores y consumidores de ácido. En consecuencia, se produce una sobre-acidificación que afecta negativamente la actividad de los metanógenos. Para evitar este efecto, es esencial que la tasa de alimentación se ajuste a la capacidad de crecimiento de los microorganismos, y que los cambios en el protocolo de alimentación se implementen de forma gradual. Asimismo, los ácidos orgánicos deben ser removidos al ritmo en que se generan, a fin de mantener un entorno estable para la conversión metanogénica [21]. Las variaciones mínimas de pH, alrededor de 0.5 unidades, pueden generar impactos significativos en el metabolismo de los microorganismos y en las reacciones cinéticas propias de la DA. La DA opera en un rango de pH entre 5.5 y 8.5. Sin embargo, los microorganismos metanógenos presentan un mejor

desempeño en pH cercanos a la neutralidad (pH~7) [17 y 22]. En la operación, el pH de un biodigestor es comúnmente mantenido entre 6.5 y 7.5. Los microorganismos metanógenos son sensibles a un pH bajo, mientras que los valores elevados de pH promueven la formación de agentes inhibidores como el  $\text{NH}_3$ . Es fundamental realizar un monitoreo continuo del pH para asegurar la proliferación de los microorganismos metanógenos [13].

Una estrategia para mantener la operación segura de la DA es el monitoreo en tiempo real, in situ, automático y continuo, llevando a cabo la lectura de parámetros durante la operación del proceso. El monitoreo de procesos tiene como objetivo comprender el mecanismo subyacente a la inestabilidad y, de esta manera, identificar indicadores de alerta temprana que reflejen el estado operativo de la DA. Además, busca desarrollar métodos precisos y equipos confiables para supervisar los indicadores de alerta establecidos [23 y 24]. En este sentido, Kalamaras et al [25] demostraron la eficacia de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en tecnología IoT de bajo costo, utilizando microcontroladores ESP32 para adquirir y analizar datos de variables críticas como pH, temperatura, potencial redox y concentración de amonio, lo que permitió detectar oportunamente descensos en la producción de biogás. Por otro lado, Zhang et al [26] propusieron un enfoque de modelado avanzado para la

supervisión de variables en tiempo real, utilizando una red jerárquica espacio temporal que permite extraer características dinámicas y espaciales del proceso a partir de datos industriales reales de plantas de residuos de cocina. En conjunto, estas investigaciones evidencian el potencial del monitoreo inteligente y automatizado para mantener la estabilidad del proceso y maximizar la producción de biogás.

Garantizar condiciones operativas óptimas en la DA es clave para mantener la estabilidad del proceso y maximizar la producción de biogás. Variables como la TCO y el TRH influyen directamente en la actividad microbiana y la inhibición por fallos asociados a la alimentación. Sin embargo, su impacto durante la fase de arranque aún requiere mayor comprensión. Por ello, este estudio busca generar conocimiento que permita ajustar estas variables oportunamente, especialmente mediante el monitoreo continuo del pH como indicador de estabilidad.

El monitoreo continuo permite tomar decisiones informadas durante la operación, lo que contribuye a prevenir fallos irreversibles asociados con la sobrecarga orgánica. El objetivo de esta investigación es analizar la dinámica de la DA en un biodigestor semi-continuo con agitación intermitente para determinar la TCO óptima y máxima durante la fase de arranque, mediante el monitoreo en tiempo real del pH, utilizando un sistema de monitoreo de bajo costo. Además, se analiza el TRH y

la influencia de la temperatura ambiente sobre la concentración de  $\text{CH}_4$  en el proceso.

## METODOLOGÍA

El diseño experimental se estableció con el propósito de evaluar la estabilidad del proceso de DA durante la fase de arranque, mediante un esquema de co-digestión basado en RFV y EV. Los RFV fueron seleccionados por su alta disponibilidad, su contenido de carbohidratos fácilmente degradables y su tendencia a generar procesos de acidificación rápida, lo que representa un desafío común en la DA por la acumulación de AGV. Por su parte, el EV se eligió como inóculo debido a su riqueza microbiológica, especialmente en comunidades metanogénicas, lo que favorece una rápida adaptación y estabilización del sistema. La estrategia de alimentación se planteó de forma gradual, con incrementos progresivos en la TCO, permitiendo identificar los límites operativos del sistema sin inducir inestabilidad significativa. Se eligió el pH como principal variable de monitoreo en tiempo real por su sensibilidad y uso generalizado como indicador temprano de inestabilidad. El monitoreo se complementó con sensores de temperatura y gases ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ), útiles para detectar tendencias en el sistema.

**Sistema experimental.** El biodigestor

**Figura 1** fue construido en un recipiente cilíndrico de polietileno de alta densidad de 18.92 L de capacidad. La configuración de operación fue en modo semi-continuo con agitación. En la parte



superior del reactor se cuenta con una válvula para la alimentación, una conexión para la instalación de sensores, un dispositivo de agitación mecánica y una válvula de salida de biogás. Adicionalmente el biodigestor cuenta con una válvula en el fondo para la toma de muestras. La descarga de lodos se encuentra a un costado del biodigestor, por el cual mediante la mecánica de fluidos se mantiene un volumen operacional de 15 L.



**Figura 1.** Biodigestor semi-continuo

El sistema de agitación consistió en un motor de corriente alterna (AC), una transmisión y un agitador de paleta. El biodigestor fue agitado a 150 RPM por periodos de 1 minuto durante cada alimentación. La operación fue a temperatura ambiente durante la temporada de otoño en Monterrey, N.L.

**Monitoreo.** Los sensores utilizados se presentan en la **Tabla 1**. Los sensores fueron calibrados acorde a las

especificaciones de los fabricantes y configurados para medir de forma automática sus respectivas variables en intervalos de cinco minutos. Los datos recopilados fueron enviados a una base de datos en la nube.

**Tabla 1.** Sensores utilizados

| Sensor  | Magnitud           | Precisión |
|---------|--------------------|-----------|
| PH-201H | pH                 | ± 0.01    |
| DS18B20 | Temperatura        | ±0.5°C    |
| MQ4     | Metano             | -         |
| MQ135   | Dióxido de carbono | -         |

- Valores no especificados por el fabricante

**Inóculo y sustrato.** El inóculo utilizado fue EV proveniente del establo de la Facultad de Agronomía de la UANL. Se colectaron 26 L de estiércol y se añadieron 10 L de agua para mejorar su manipulación y reducir la viscosidad. El inóculo fue mantenido a temperatura ambiente en el laboratorio de biotecnología bacteriana de la Facultad de Agronomía. El periodo de estabilización del EV fue de 15 días.

El sustrato consistió en una mezcla de residuos de frutas y verduras (RFV) provenientes de uso doméstico. Los cuales fueron triturados, pesados y almacenados para su uso. La caracterización del EV y los RFV se presenta en la **Tabla 2**. Se determinaron los sólidos totales, volátiles y cenizas según el protocolo APHA/AWWA/WEF [27]. El porcentaje de humedad se calculó conforme a la norma mexicana NMX-AA-16-1984 [28], y el pH se midió según la normativa NMX-AA-25-1984 [29].

**Tabla 2.** Caracterización del inóculo y sustrato

| Propiedad                      | Estiércol de vaca | Frutas y verduras |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|
| Sólidos totales (%)            | 8.70±0.50         | 14.59±1.63        |
| Sólidos volátiles (%)          | 7.17±0.52         | 11.76±1.65        |
| Cenizas (%)                    | 1.52±0.01         | 2.82±3.13         |
| Humedad (%)                    | 91.29±0.50        | 85.5±1.63         |
| pH                             | 7.61±0.02         | 4.45±0.02         |
| Densidad (g mL <sup>-1</sup> ) | 0.98±0.01         | 0.89±0.02         |

**Protocolo de alimentación.** El protocolo de alimentación propuesto se presenta en la **Tabla 3**. La alimentación se estableció en función del TRH. La alimentación aumentó de forma gradual. El TRH comienza en 90 días para finalizar en 30 días. La proporción de la alimentación fue 2:1 (vol:vol) de RFV y EV.

**Análisis en tiempo real.** Por medio del sistema de monitoreo se supervisó el biodigestor en tiempo real, observando el comportamiento del pH después de ser alimentado. Como criterio de modificación del protocolo de alimentación inicial (**Tabla 3**) se estableció un límite inferior de pH 6.7. Si los valores de pH descienden por debajo de este límite, la alimentación será suspendida y se ajustará a un esquema de alimentación cada dos días, siempre y cuando el pH se recupere a valores cercanos a 7.0. Este protocolo tiene como objetivo prevenir inhibición irreversible de los microorganismos del biodigestor.

**Tabla 3.** Protocolo de alimentación inicial

| Número de Carga | TRH (d) | Volumen Carga (L) | TCO (g SV L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|---------|-------------------|---------------------------------------------|
| 1               | 90      | 0.167             | 1.137                                       |
| 2               | 82.5    | 0.182             | 1.241                                       |
| 3               | 75      | 0.200             | 1.365                                       |
| 4               | 67.5    | 0.222             | 1.516                                       |
| 5               | 60      | 0.250             | 1.706                                       |
| 6               | 52.5    | 0.286             | 1.950                                       |
| 7               | 45      | 0.333             | 2.275                                       |
| 8               | 37.5    | 0.400             | 2.730                                       |
| 9               | 30      | 0.500             | 3.412                                       |

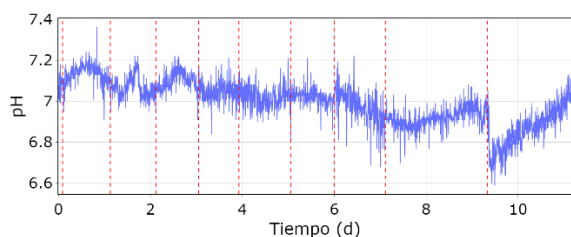
**Procesamiento de datos.** Para el procesamiento de los datos, estos fueron descargados de la base de datos. Se realizó una limpieza inicial, reemplazando los valores no numéricos y atípicos por la media de la respectiva variable. Seguido, se aplicó una media móvil de seis observaciones para suavizar la serie temporal de acuerdo con la Ecuación (3):

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_{t-i} \quad (3)$$

Donde  $SMA_t$  representa la media móvil en el tiempo  $t$ ,  $n$  es el número de observaciones, y  $x_{t-1}$  es el valor de la serie de tiempo en el tiempo  $t-1$ . Posteriormente, se calcularon las estadísticas descriptivas (media, desviación estándar y rango) de las variables. Finalmente, se elaboró una gráfica con el fin de observar la dinámica y evolución de las variables a través del tiempo.

## RESULTADOS

La **Figura 2** muestra el comportamiento del pH durante los 10 días de monitoreo, el pH promedio fue de  $6.99 \pm 0.1$ . Las líneas verticales rojas indican los momentos en que el biodigestor fue alimentado, conforme al protocolo de alimentación. Al inicio del experimento hasta el día 3, el pH aumentó después de cada carga de alimentación al biodigestor para posteriormente descender. Entre los días 3 y 6, el comportamiento del pH mostró cambios mínimos en sus valores. Durante este período (día 5) se registró la mayor concentración de  $\text{CH}_4$ , lo que puede atribuirse a la actividad del consorcio de microorganismos encargados de la producción de biogás y al mantenimiento de la estabilidad del sistema, junto con factores externos favorables como la temperatura [12]. Se puede observar que en el día 6 el pH presenta una tendencia a la baja, llegando a valores debajo de 6.9.



**Figura 2.** Comportamiento del pH a través del tiempo

Derivado de la carga 8 (día 7), el pH siguió con una tendencia a la baja por lo que se tomó la decisión de prolongar el tiempo de alimentación hasta el día 9, ya que en ese periodo se registraron valores de pH por debajo de 7.0 y se ha

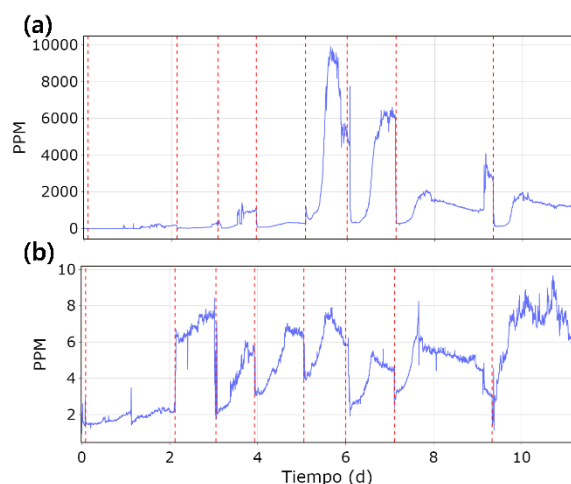
observado que la tasa de crecimiento de los microorganismos metanógenos se reduce considerablemente por debajo de un pH de 6.5 [30]. La alimentación se retomó el día 9 con la carga 9 con un volumen de 0.5 L, lo que provocó una disminución del pH hasta 6.66. Es importante mencionar que dados los cambios realizados en el protocolo de alimentación correspondientes a la carga 8, en el día 7, consistió en 0.4 L, el TRH real es de 75 días y la TCO real de 1.365, el doble de la originalmente establecida en el protocolo inicial. En el caso de la carga 9, realizada el día 9, se suministraron 0.5 L, con un TRH real de 60 días y una TCO real de 1.706. Estos valores corresponden a las mismas condiciones de las cargas 3 y 5 de alimentación, respectivamente. Por lo que, una alimentación menor diaria permite registrar mayor estabilidad en el pH del biodigestor.

Los cambios de pH significativos durante la operación están asociados a variaciones en la composición del material de alimentación o a la sobrecarga de alimentación debido a la acumulación de AGV en el sistema lo cual obstaculiza la metanogénesis [20 y 31]. Además, las bajas temperaturas presentadas pueden estar asociadas con una baja actividad metabólica de los microorganismos [32].

La **Figura 3** muestra la concentración de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  en PPM a través del tiempo, las líneas verticales rojas indican la activación de la agitación del sistema y extracción de biogás. En el caso del metano, el valor promedio fue de

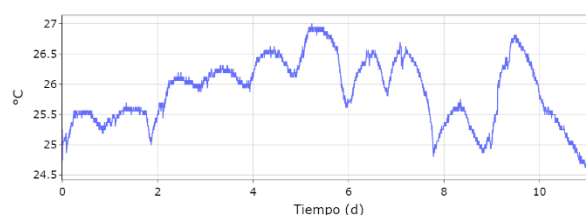


1261±1934 PPM, los valores mínimos se registraron al inicio del experimento, con un valor de 0.99 PPM y el valor máximo fue alcanzado en el día 5 con una concentración de 9909.33 PPM. El dióxido de carbono tuvo un valor promedio de 4.89±4.89 PPM, el mínimo registrado fue de 0.97 PPM y el máximo de 9.68 PPM en el día 10. Dado que cuando se extrae el biogás, la concentración disminuye, las concentraciones de gases varían con la operación. Al ser alimentado el biodigestor, el biogás se vuelve a producir y acumularse, lo que aumenta las concentraciones nuevamente. De igual forma, las concentraciones varían acorde a los sustratos empleados y la calidad del proceso, en este caso, el dióxido de carbono presentó concentraciones bajas en comparación con el metano, quien es el componente principal del biogás. Generalmente se estiman concentraciones menores a 200 ppm tras su eliminación [33].



**Figura 3.** Comportamiento de la concentración de gas (a) CH<sub>4</sub> y (b) CO<sub>2</sub>

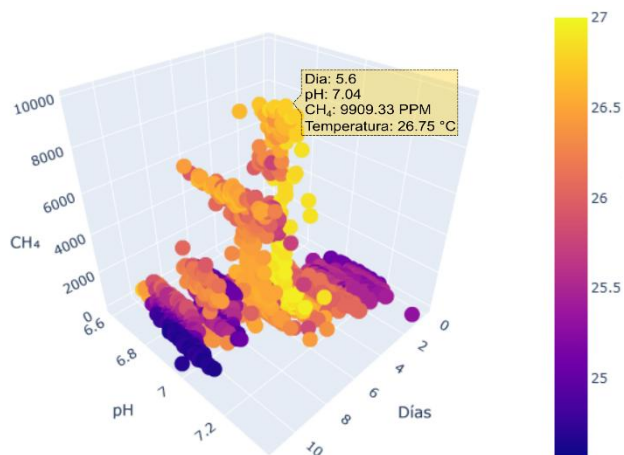
La evolución de la temperatura del biodigestor se muestra en la **Figura 4**. La temperatura promedio fue de 25.87±0.56 °C, la temperatura máxima fue de 27 °C y la mínima de 24.56 °C, implicando un rango de temperatura de operación mesófilo. Las temperaturas mesófilas y termófilas son las comúnmente utilizadas por biodigestores comerciales, con el propósito de mantener tasas de producción de metano máximas de 0.03-0.65 y 0.04-0.31 L·g<sup>-1</sup> VS·d<sup>-1</sup> [1]. Otros estudios han demostrado resultados prometedores a temperaturas de 20±1 °C con rendimientos específicos de metano de 0.233±0.028 L g<sup>-1</sup> VS con TCO de 4.5–5.1 g VS L<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> [34].



**Figura 4.** Comportamiento de la temperatura a través del tiempo

La **Figura 5** muestra la interacción entre la concentración de metano, el pH y la temperatura a lo largo del tiempo. El gradiente de colores refleja como las temperaturas más altas (color amarillo) están asociadas a mayores concentraciones de metano, esto sugiere un impacto positivo de la temperatura. Se observa que las condiciones óptimas para la metanogénesis, caracterizadas por un pH en el intervalo de 7.0 a 7.2 [35] y una temperatura de 26.75 °C, coinciden con la máxima producción de metano registrada. Esto está alineado con el TRH de 60 días, donde se observa

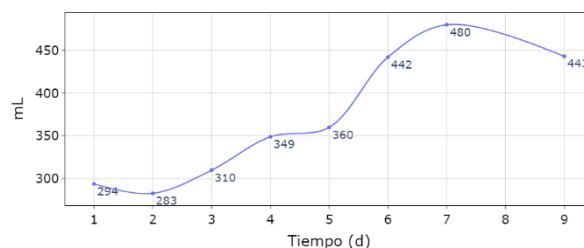
estabilidad en el sistema. La selección adecuada del TRH deriva en rendimientos altos de biogás, debido a que está asociado a las tasas de crecimiento de los microorganismos metanógenos y al tiempo de descomposición de los compuestos orgánicos [36].



**Figura 5.** Interacción entre la concentración de metano, pH y temperatura a través del tiempo

El biogás fue medido por desplazamiento volumétrico (**Figura 6**). La producción de biogás se cuantificó del día 1 al día 9, acorde a la operación del biodigestor. La producción de biogás presentó una tendencia positiva obteniendo la mayor producción el día 7 con 0.480 L de biogás, el rendimiento fue de  $0.0114 \text{ L g}^{-1} \text{ SV d}^{-1}$ , este rendimiento se alinea con los trabajos presentados en literatura [1]. El biogás presentó flamabilidad, sin embargo, no tiene la capacidad de sostener la flama, por lo que se considera necesaria una purificación. La purificación del biogás permite obtener biometano, el cual típicamente contiene entre 95 % y 99 % de  $\text{CH}_4$ , 1 % a 5 % de  $\text{CO}_2$  y cantidades

insignificantes de  $\text{H}_2\text{S}$ . Esto consiste en eliminar gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , entre otros gases en menor proporción, tales como  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , ácidos orgánicos volátiles y vapor de agua [37].



**Figura 6.** Producción de biogás medido por desplazamiento volumétrico

La TCO óptima se estimó en 0.250 L y un TRH de 60 días. Durante este periodo se presentó un pH estable y una alta concentración de  $\text{CH}_4$  en el biogás. Este comportamiento también pudo ser influenciado por el aumento en las temperaturas. La TCO máxima se estimó en 0.286 L y un TRH de 52.5 días, asociados con el día 6 de operación, a partir de este día se observaron caídas más pronunciadas en el pH y recuperaciones más tardías, lo que sugiere una sobrecarga de alimentación.

Estos hallazgos muestran coincidencias con lo reportado en la literatura, donde se han explorado distintas condiciones operativas. Orhorhoro et al [21] reportaron que una TCO de  $1.5 \text{ kg VS m}^{-3} \text{ día}^{-1}$  optimizó la producción de biogás, mientras que valores superiores redujeron la producción de biogás como el pH del sistema. En contraste, Darwin e Fazil, [38] observaron un buen desempeño incluso con una TCO elevada de  $4.17 \text{ kg VS m}^{-3} \text{ día}^{-1}$  al co-

digerir cáscara de cacao y estiércol, lo que sugiere un efecto sinérgico entre las propiedades de los sustratos que contribuye a mantener la estabilidad del sistema. Por su parte, Rasouli y Ataeiyan, [39] recomendaron rangos de TCO entre 1.6 y 3.4 kg VS m<sup>-3</sup> día<sup>-1</sup>, dependiendo de la temperatura, destacando la influencia crítica de esta variable en la estabilidad del sistema. En conjunto, estos estudios coinciden en señalar la TCO, la temperatura y la estabilidad del sistema como factores clave para el rendimiento del proceso de DA.

## CONCLUSIONES

Esta investigación evaluó el desempeño durante la fase de arranque de un biodigestor operado bajo un esquema de co-digestión, utilizando un protocolo de alimentación con incremento progresivo de la carga orgánica total. El monitoreo continuo permitió capturar la dinámica del sistema, evidenciando la interacción entre las variables clave del proceso. Para el día 5 de operación se alcanzaron condiciones óptimas de funcionamiento, caracterizadas por un tiempo de retención hidráulica de 60 días y una TCO de 1.950 gSV L<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>, alcanzándose la mayor concentración de metano (99,099.33 ppm), asociada a un pH de 7.04 y una temperatura máxima de 26.8 °C. El rendimiento promedio de biogás fue de 0.0114 L g<sup>-1</sup> SV d<sup>-1</sup>. Los resultados indican que el sistema presenta un potencial de mejora mediante el control de temperatura. No obstante, se demuestra que, con un

sistema de monitoreo de bajo costo, es posible identificar las condiciones operativas óptimas, incluso sin control térmico. Operar en condiciones mesofílicas óptimas (alrededor de 35 °C) podría incrementar la actividad metabólica de los microorganismos metanogénicos, mejorando la tasa de conversión y el rendimiento volumétrico de biogás.

## AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación de Ingeniería de Bioprocesos de la Facultad de Agronomía, UANL; al CONAHCYT por la beca otorgada (CVU: 1232403); y al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación (ProACTI 2023-2024) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (claves: 147-IDT-2023 y 32-IDT-2024).

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA POR IA EN EL PROCESO DE REDACCIÓN

Durante la redacción de este trabajo, los autores utilizaron ChatGPT como servicio de corrector de estilo en el proceso de redacción. Posteriormente, revisaron y editaron el contenido generado por este servicio.

## REFERENCIAS

- [1] Nie E, He P, Zhang H, Hao L, Shao L, Lü F (2021). How does temperature regulate anaerobic digestion? Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150 111453.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111453>
- [2] Pradeshwaran V, Sundaramoorthy V, Saravanakumar A (2024). A comprehensive review on biogas production from food waste: Exploring cutting-edge technologies and innovations. *Biomass and Bioenergy*. 188 107336. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107336>
- [3] Kabeyi M.J.B, Olanrewaju O.A (2022). Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*. 8 774–86. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.007>
- [4] Ambrose H.W, Philip L, Suraishkumar G.K, Karthikaichamy A, Sen T.K (2020). Anaerobic co-digestion of activated sludge and fruit and vegetable waste: Evaluation of mixing ratio and impact of hybrid (microwave and hydrogen peroxide) sludge pre- treatment on two-stage digester stability and biogas yield. *Journal of Water Process Engineering*. 37 101498. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101498>
- [5] Ngabala F.J, Emmanuel J.K (2024). Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion-an alternative energy source. *Heliyon*. 10 e40632. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40632>
- [6] Pellerá F.-M, Gidarakos E (2017). Anaerobic digestion of solid agroindustrial waste in semi-continuous mode: Evaluation of mono-digestion and co-digestion systems. *Waste Management*. 68 103–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.026>
- [7] Karki R, Chuenchart W, Surendra, K.C, Shrestha S, Raskin L, Sung, S. et al. (2021). Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*. 330 125001. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>
- [8] Miramontes-Martínez L.R, Gomez-Gonzalez R, Botello-Álvarez J.E, Escamilla-Alvarado C, Albalade-Ramírez A, Rivas-García P (2020). Semi-continuous anaerobic co-digestion of vegetable waste and cow manure: a study of process stabilization. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19, 1117–34. <https://doi.org/10.24275/rmiq/proc920>
- [9] Mlaik N, Sayadi S, Mnasri N, Kechaou S, Loukil S, Aloui F, et al. (2023). Dry mesophilic anaerobic co-digestion of vegetable wastes with animal manures using leach bed reactor. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 13 697–707. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01165-3>
- [10] Miramontes-Martínez L.R, Rivas-García P, Albalade-Ramírez A, Botello-Álvarez J.E, Escamilla-Alvarado C, Gomez-Gonzalez R, et al. (2021). Anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste: Synergy and process stability analysis. *Journal of the Air & Waste Management*

- Association. 71 620–32.  
<https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1873206>
- [11] Wang Y, Yan P, Gai M (2021). Dynamic Soft Sensor for Anaerobic Digestion of Kitchen Waste Based on SGSTGAT. *IEEE Sensors Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 21 19198–208. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3090524>
- [12] Gyadi T, Bharti A, Basack S, Kumar P, Lucchi E, (2024). Influential factors in anaerobic digestion of rice-derived food waste and animal manure: A comprehensive review. *Bioresource Technology*. 413 131398. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131398>
- [13] Panigrahi S, Dubey B.K (2019). A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy*. 143 779–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>
- [14] Matheri A.N, Ndiweni S.N, Belaid M, Muzenda E, Hubert R (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80 756–64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.068>
- [15] Yan X, Deng P, Ding T, Zhang Z, Li X, Wu Z (2023). Effect of Temperature on Anaerobic Fermentation of Poplar Ethanol Wastewater: Performance and Microbial Communities. *ACS Omega*. 8 5486–96. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06721>
- [16] Wu J, Zhang H, Zhao Y, Yuan X, Cui Z (2024). Effect of Temperature on the Inocula Preservation, Mesophilic Anaerobic Digestion Start-Up, and Microbial Community Dynamics. *Agronomy*. 14 2991. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122991>
- [17] Meegoda J.N, Li B, Patel K, Wang L.B (2018). A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI AG. 15 2224. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- [18] Ding Y, Liang Z, Guo Z, Li Z, Hou X, Jin C (2019). The Performance and Microbial Community Identification in Mesophilic and Atmospheric Anaerobic Membrane Bioreactor for Municipal Wastewater Treatment Associated with Different Hydraulic Retention Times. *Water*. 11 160. <https://doi.org/10.3390/w11010160>
- [19] Zhang Y, Wang X, Hu M, Li P (2015). Effect of hydraulic retention time (HRT) on the biodegradation of trichloroethylene wastewater and anaerobic bacterial community in the UASB reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*.



- 99 1977–87.  
<https://doi.org/10.1007/s00253-014-6096-6>
- [20] Wu D, Li L, Peng Y, Yang P, Peng X, Sun Y, et al. (2021). State indicators of anaerobic digestion: A critical review on process monitoring and diagnosis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 148 111260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111260>
- [21] Orhorhoro E.K, Ebunilo, P.O, Sadjere G.E (2018). Effect of Organic Loading Rate (OLR) on Biogas Yield Using a Single and Three-Stages Continuous Anaerobic Digestion Reactors. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 39 147–55. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.39.147>
- [22] Prasanna-Kumar, D.J, Mishra R.K, Chinnam S, Binnal P, Dwivedi N. (2024). A comprehensive study on anaerobic digestion of organic solid waste: A review on configurations, operating parameters, techno-economic analysis and current trends. *Biotechnology Notes*. 5 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2024.02.001>
- [23] Wu D, Li L, Zhao X, Peng Y, Yang P, Peng X (2019). Anaerobic digestion: A review on process monitoring. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 103 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.039>
- [24] Cruz I.A, Andrade L.R.S, Bharagava R.N, Nadda A.K, Bilal M, Figueiredo R.T, et al. (2021). An overview of process monitoring for anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*. 207 106–19. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.04.008>
- [25] Kalamaras S.D, Tsitsimpikou M.-A, Tzenos C.A, Lithourgidis A.A, Pitsikoglou D.S, Kotsopoulos T.A (2024). A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor. *Applied Sciences*. 15 34. <https://doi.org/10.3390/app15010034>
- [26] Zhang N, Wang Y, Gai M, Yan P (2024). Dynamic Soft Sensor Development Based on Hierarchical Spatiotemporal Extreme Learning Machine for Anaerobic Digestion Process. 2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), IEEE. p. 3771–6. <https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587981>
- [27] APHA-AWWA-WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21a ed. American Public Health Association. Washington, D.C., USA.
- [28] SECOFI (1992). NMX-AA-016-1984: Protección al ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos municipales – Determinación de humedad. Secretaría de Comercio y

- Fomento Industrial. Ciudad de México, México.
- [29] SECOFI (1992). NMX-AA-025-1984: Protección al ambiente – Contaminación del suelo – Residuos sólidos – Determinación del pH – Método potenciométrico. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Ciudad de México, México.
- [30] Mpofu A.B, Welz P.J, Oyekola O.O (2020). Anaerobic Digestion of Secondary Tannery Sludge: Optimisation of Initial pH and Temperature and Evaluation of Kinetics. Waste and Biomass Valorization. 11 873–85. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00564-y>
- [31] Alkhrissat T (2024). The impact of organic loading on the anaerobic digestion of cow manure: Methane production and kinetic analysis. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 9 100589. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100589>
- [32] Tamkin A, Martin J, Castano J, Ciotola R, Rosenblum J, Bisesi M (2015). Impact of organic loading rates on the performance of variable temperature biodigesters. Ecological Engineering. 78 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.005>
- [33] Quintino F.M, Fernandes E.C (2018). Analytical correlation to model diluent concentration repercussions on the burning velocity of biogas lean flames: Effect of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>. Biomass and Bioenergy. 119 354–63. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.034>
- [34] Bele V, Goyette B, An C, Achouri I.E, Chaib O, Rajagopal R (2024). A robust, low-temperature, closed-loop anaerobic system for high-solid mixed farm wastes: advancing agricultural waste management solutions in Canada. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33654-7>
- [35] Van D.P, Fujiwara T, Leu Tho B, Song-Toan P.P, Hoang-Minh G (2019). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. Environmental Engineering Research. 25 1–17. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>
- [36] David B, Federico B, Cristina C, Marco G, Federico M, Paolo P (2019). Biohythane Production From Food Wastes. Biohydrogen. 347–68. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64203-5.00013-7>
- [37] Atelge M.R, Senol H, Djaafri M, Hansu T.A, Krisa D, Atabani A, et al. (2021). A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. Sustainability. 13 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>
- [38] Darwin, M.I, Fazil A (2018). Performance and kinetic study of the anaerobic co-digestion of cocoa husk and digested cow

manure with high organic loading rate. INMATEH - Agricultural Engineering. 55 131.

- [39] Rasouli M, Ataeiyan B (2024). Investigation and Optimization of Operational Conditions of Anaerobic Digestion Process for Enhanced Biogas Production Yield in a CSTR Using RSM. Rokhum SL, editor. International Journal of Energy Research. <https://doi.org/10.1155/2024/9158477>