

Influencia de variables cinéticas en la producción de biogás evaluada con un modelo matemático simplificado

Influence of kinetic variables on biogas production evaluated with a simplified mathematical model

Erick A. Ortiz ^{1,2*}, Yeraldin L. González ^{1, 2*}, Marian Ramírez ^{2*}, Euclides Deago ^{2,3, 4*}

^{1*} *Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá* ^{2*} *Grupo de Investigación Biosólidos: Energía y Sostenibilidad (BioES); Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas. Universidad Tecnológica de Panamá, Ciudad de Panamá 0819-07289, Panamá; erick.ortiz@utp.ac.pa (E.O.); yeraldin.gonzalez@utp.ac.pa (Y.G.); euclides.deago@utp.ac.pa (E.D); marian.ramirez@utp.ac.pa (M.R.)* ^{3*} *Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ingeniería y Tecnología (CEMCIT-AIP), Ciudad de Panamá 0819-07289, Panamá* ^{3*} *Sistema Nacional de Investigación (SIN), Ciudad de Panamá 0816-02852, Panamá.*

***Autor de correspondencia:** euclides.deago@utp.ac.pa

RESUMEN. Actualmente la sociedad en general depende fuertemente de energías que son limitadas, debido a esto, se busca generar energías sostenibles y una de estas es la producción de biogás a través de la digestión anaeróbica, en donde las bacterias degradan la materia orgánica. Este proceso ha mostrado grandes avances, no obstante, es necesario seguir estudiando el comportamiento de las bacterias ante la gran variabilidad del entorno a las que se encuentren expuestas. El objetivo de esta investigación es evaluar la influencia de las variables de crecimiento y consumo de los microorganismos cuando se utiliza lodo residual de la planta de tratamiento de Juan Díaz, que abastece a la ciudad de Panamá. Se llevó a cabo un ensayo experimental de digestión anaeróbica con un periodo de 15 días, con el fin de conocer la producción de biogás, y consecutivamente a esto se utilizó un modelo basado en ecuaciones diferenciales que describen el proceso para entender de qué forma reaccionaban los microorganismos ante las condiciones impuestas. El modelo utilizado empleó parámetros iniciales extraídos de literaturas y posteriormente fue calibrado a las condiciones reales en donde se pudo evidenciar que la influencia de la temperatura, repercute fuertemente en el incremento de la velocidad con que los microorganismos degradan la materia y el factor de conversión a biogás, pese a esto, es de suma importancia conocer el sustrato que se estará utilizando, monitorear constantemente y estudiar de forma continua como reducir el efecto de las inhibiciones que pueden complicar el desarrollo del proceso.

Palabras clave. Biogás, digestión anaeróbica, modelado, variables cinéticas.

ABSTRACT. Currently, society in general depends heavily on energy that is limited, due to this, the generation of sustainable energy is being sought and one of these is the production of biogas through anaerobic digestion (AD), where bacteria degrade organic matter. This process has shown great advances; however, it is necessary to continue studying the behaviour of bacteria in the face of the great variability of the environment to which they are exposed. To evaluate the kinetics of growth and consumption of microorganisms when using residual sludge from the Juan Diaz WWTP, which supplies the city of Panama, an experimental DA test was carried out for a period of 15 days, in order to know the biogas production, and consequently, a model based on differential equations describing the process was used to understand how the microorganisms reacted to the imposed conditions. The model used employed initial parameters extracted from literature and was later calibrated to real conditions where it was possible to demonstrate that the influence of temperature, for example, has a strong impact on the increase in the speed with which the microorganisms degrade the material and the conversion factor to biogas, despite this, it is extremely important to know the substrate that will be used, constantly monitor and study continuously how to reduce the effect of inhibitions that can complicate the development of the process.

Citación: E. Ortiz, Y. González, M. Ramírez y E. Deago, "Influencia de variables cinéticas en la producción de biogás evaluada con un modelo matemático simplificado", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 2, pp. (0), 2024.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 17 de noviembre de 2023. **Recibido con correcciones:** 20 de febrero de 2024. **Aceptado:** 20 de febrero de 2024.

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4056>

Copyright: 2024 E. Ortiz, Y. González, M. Ramírez y E. Deago. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Keywords. Biogas, anaerobic digestion, modeling, kinetic variables.

1. Introducción

Los países en crecimiento económico están sujetos a la cantidad de actividades que generan, de manera que, una economía en vías de desarrollo como la de Panamá, requieren una mayor demanda de energía, lo que lleva a impulsar nuevas fuentes que sean confiables para la protección de los recursos [1].

Las energías generadas del petróleo, el gas natural, el carbón mineral y sus derivados, son fuentes no renovables que actualmente están agotándose, lo que lleva a ser cada día más complejo y costoso su explotación. Por otra parte, la biomasa se produce de manera continua, siendo inagotable al alcance humano [1], logrando que, su obtención pueda ser sustentable a lo largo del tiempo, sostenible y relativamente amigable con el ambiente [2].

Esta biomasa, está formada por un conjunto de materia orgánica, con diferentes orígenes y naturaleza. Siendo una fuente de estas, las generadas en las aguas residuales, así como también, los lodos producto de la depuración en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y residuos orgánicos urbanos [3].

Actualmente, se están generando grandes cantidades de biomasa en forma de lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, lo que ha llevado a generar un problema en la disposición de estos subproductos al darse el proceso de forma incorrecta, dado que no se siguen las normas de uso y disposición final, provocando altos niveles de contaminación [4].

Una solución a la disposición de los lodos residuales es promoviendo una valorización energética de residuos orgánicos y biomasa mediante procesos biológicos conocidos como digestión anaeróbica, ya que, se buscaría la protección del medio ambiente y una alternativa que sustituya las energías no renovables [5]. Este proceso de digestión anaeróbica consiste en una degradación microbiana en ausencia de oxígeno, originando una mezcla de gases conocida como Biogás, compuesta principalmente de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %) [6].

Ciertamente, se han logrado grandes avances en el proceso de digestión anaeróbica, a pesar de ello, es necesario que en todo proceso se contemplen factores que permitan una optimización de esta, donde se considere la materia a usar y los parámetros operacionales que

intervienen [7]. Una forma de lograr esto es realizar modelos matemáticos, que permitan predecir el comportamiento del proceso y la relevancia de las variables cinéticas que influyen en el mismo, de manera que alcancen a predecir en distintos escenarios el desarrollo del proceso [8], permitiendo una eficiencia y eficacia para obtener resultados.

Sin embargo, una modelación sin experimentación brinda inseguridad, por lo que es necesario ajustar el modelo para obtener resultados correctos, de modo que exista una mayor confiabilidad en los resultados modelados para las condiciones establecidas [9]. Así surge la necesidad de realizar ensayos experimentales específicos que junto con el modelo permitan realizar una estimación paramétrica, donde se asemejen los parámetros, utilizando la minimización de error entre los datos experimentales y datos modelados [10]. De forma, que si se logra la reducción paramétrica y se analiza cómo las variables cinéticas influyen en el proceso, se simula correctamente el proceso de digestión anaeróbica [9]. Siendo así el objetivo de esta investigación es evaluar la influencia de las variables cinéticas de la digestión anaeróbica mediante un modelo matemático simplificado.

2. Materiales y Métodos

Para lograr el objetivo de esta investigación se desarrollaron dos etapas, la primera consistió en realizar un ensayo experimental de digestión anaeróbica para obtener la producción de biogás que sería utilizada en la siguiente fase, la cual busca obtener un modelo matemático que permita observar el comportamiento de los parámetros cinéticos que intervienen en la digestión anaeróbica y así, conocer cuáles son los valores correctos para lograr una producción adecuada de biogás.

2.1 Ensayo experimental

El montaje experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Biosólidos del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá. Se usaron lodos orgánicos de la PTAR de Juan Díaz, siguiendo los reglamentos de la DGNTI-COPANIT 47-2000, la cual reglamenta el uso y disposición final de los lodos [11].

El proceso de digestión anaeróbica fue realizado con una mezcla conformada por un inóculo, un sustrato y un cosustrato. El inóculo es el lodo digerido que resulta de la digestión anaeróbica realizada en la PTAR de Juan Díaz, el cosustrato es el lodo espesado previo a la digestión anaeróbica de la PTAR, y el sustrato fue una mezcla de residuos orgánicos de vegetales y frutas, realizada en laboratorio.

Fue necesario medir previamente los sólidos volátiles y totales de los componentes a utilizarse en la muestra, los cuales fueron determinados con la norma EPA [12], esto con la finalidad de conocer la concentración de cada componente y así utilizando las ecuaciones (1 y 2) [12], se calculó los volúmenes necesarios de inóculo y sustrato a emplearse.

$$V_s = \frac{(V)(I_{SV})}{(ISR)(S_{SV}) + I_{SV}} \quad (1)$$

$$V_I = V - V_S \quad (2)$$

Donde V: volumen útil de reactor (L); ISV: concentración de sólido volátil de inóculo (g/L); SSV: concentración de sólido volátil del sustrato(g/L); ISR: relación inóculo sustrato; VS: volumen de sustrato (L) y VI: volumen de inóculo (L).

Los ensayos fueron realizados para una relación de inóculo/sustrato con respecto a los sólidos volátiles de 1:1 y 2:1, en reactores batch con volumen de 250 mL a 35 °C por 15 días. Se usó un volumen de trabajo de 100 mL. Con las ecuaciones (1 y 2) se obtuvieron los volúmenes de inóculo y sustratos (Tabla 1).

Tabla 1. Volumen de inóculo y sustrato resultantes para realizar el ensayo.

| Relación | Inóculo | Sustrato |
|----------|--|---------------------------------------|
| 1:1 | 50 mL de lodo digerido y 25 mL de agua destilada | 15 mL de lodo espesado y 10 mL de ROM |
| 2:1 | 35 mL de lodo digerido y 20 mL de agua destilada | 30 mL de lodo espesado y 15 mL de ROM |

Para este ensayo se usó el sistema manométrico OxiTop® (Figura 1), el cual consiste en medir los diferenciales de presión dentro de los reactores generados por las actividades microbiológicas [13].



Figura 1. Montaje del ensayo en reactores tipo Batch usando el sistema OxiTop®.

En el transcurso del ensayo se hicieron monitoreos en los cuales fue necesario controlar los niveles de pH para lo cual se utilizó soluciones de 1M de NaOH para aumentar los niveles y 1M de HCl para disminuirlos. Al finalizar el montaje, se procedió a calcular el potencial bioquímico de metano (PBM), partiendo de los diferenciales de presiones obtenidos con el sistema OxiTop®. Para determinar el PBM se aplicaron las ecuaciones del método manométrico [14] [15].

Tabla 2. Parámetros Constantes utilizados en ecuaciones de PBM para la relación 1:1 y la relación 2:1. Adaptado de [16].

| | |
|-----------------------------|--------|
| V (L) | 0.15 |
| R (atm LK-1mol-1) | 0.082 |
| Te (°K) | 308.15 |
| TCE (°K) | 273.15 |
| PCE (atm) | 1.00 |
| Vu (L) | 0.10 |
| MH ₂ O (mol L-1) | 55.56 |

Obtenidos los valores de PBM se procedió a determinar el volumen de biogás generado, esto se debe a que el PBM funciona solamente para evaluar la calidad de los sustratos en cuanto al potencial de producción de biogás [17]. Es por esa razón que al conocer el PBM de un sustrato en específico se procede a calcular la cantidad aproximada de biogás total que produzca a partir de la cantidad de sustrato que se ha utilizado, dicha cantidad se determina a partir de la ecuación (3).

$$V_{\text{Biogás}} = \text{PBM} \times \text{SV} \times V_s \quad (3)$$

Donde PBM es el Potencial Bioquímico de Metano (LgSV-1); Vs: Volumen de sustrato (L); y SV: Concentración de sólidos volátiles (g L-1).

2.2. Modelo Matemático

El modelo matemático desarrollado tiene el enfoque de predecir la producción de biogás a través del proceso de digestión anaeróbica, razón por la que es posible evaluar la influencia de las variables cinéticas durante el proceso, dicho modelo sigue el proceso mostrado en la figura 2.

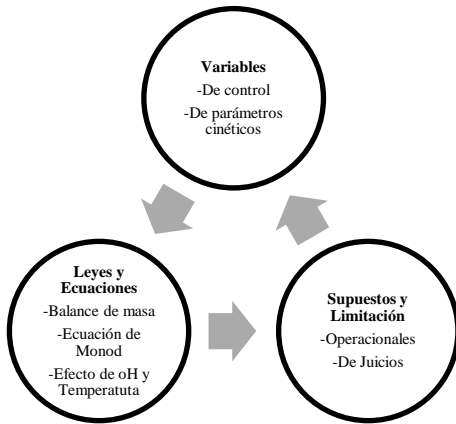


Figura 2. Proceso realizado para el desarrollo del modelo matemático.

Al realizar el modelo se emplearon las ecuaciones (4, 5, y 6), las cuales fueron adaptadas de la literatura [18], llevándolas a las condiciones del ensayo experimental realizado, además se usaron las variables cinéticas mayormente referenciadas [18] para iniciar la corrida del modelo, estas se muestran en la tabla 3.

$$\frac{dx}{dt} = \mu X - K_d X \quad (4)$$

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\mu X}{Y_x 1} \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dx}{dt} Y_x \quad (6)$$

Siendo μ la Tasa de crecimiento de los microorganismos anaeróbicos; K_d Velocidad de decaimiento de los microorganismos; $Y_x 1$ el Coeficiente de producción de nuevas células (g/g), Y_x : Factor de conversión de biogás (L-biogás/g-microorganismo); μ_{max} : Cinética crecimiento biomasa; y K_s : Constante de saturación media de sustrato.

Tabla 3. Parámetros utilizados en el modelo matemático.

| Variable | Valor | Unidad |
|-------------|-------|--------|
| μ_{max} | 0.35 | 1/d |
| K_s | 150 | g/L |
| K_d | 0.02 | 1/d |
| y_{x1} | 0.82 | g/g |
| Y_x | 0.27 | L/g |

En el desarrollo del modelo se definieron algunas consideraciones: que al tratarse de un reactor batch no hay tasa de materia entrante ni tasa de materia saliente, lo que también permite trabajar con un volumen constante; y que el proceso dominante es el consumo de sustrato para la formación de nuevas células microbianas. Entonces, para el crecimiento bacteriano de los microorganismos anaeróbicos (μ) se utilizó el modelo propuesto por Monod aplicando la ecuación (7), descrita por dicho modelo [19].

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \quad (7)$$

Al aplicar el efecto del pH dentro del modelo anaeróbico se tomó como referencia el gráfico presentado en la figura 3, el cual muestra el comportamiento de la actividad microbiana en relación con la variabilidad de los niveles de pH, por lo cual se aproximaron sus valores logrando obtener la ecuación (8), la cual fue introducida en el modelo. De igual manera los rangos de temperatura se muestran en el gráfico de la figura 4, tomando esto de referencia se obtuvo un gráfico linealizado en rangos de temperatura de 25°C a 35° logrando obtener los porcentajes de crecimiento respecto a dichas temperaturas.

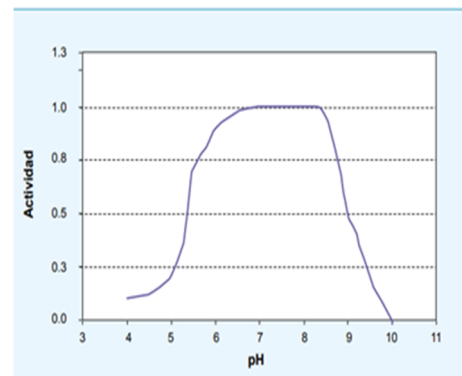


Figura 3. Dependencia del pH de la actividad de los microorganismos. Adaptado de [20].

$$y = -0.1036x^2 + 1.4514x - 4.1179 \quad (8)$$

Donde y es factor de dependencia; x es pH del reactor.

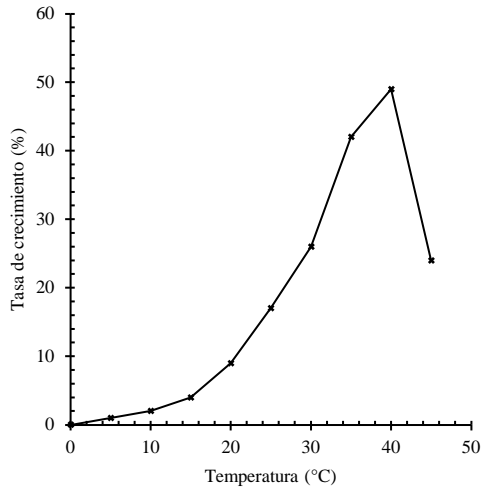


Figura 4. Dependencia de la tasa de crecimiento bacteriano en función de la temperatura. Adaptado de [21].

El modelo matemático fue desarrollado en Microsoft Excel y aplicando el módulo Solver, donde se resolvieron las ecuaciones diferenciales planteadas para el proceso de digestión anaeróbica con el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Este método soluciona ecuaciones diferenciales con la forma mostradas en la ecuación (9).

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \tag{9}$$

El método de Runge-Kutta fue utilizado ya que permite un margen de solución mínimo en comparación con la solución real [22]. Para obtener los resultados en la modelación se tuvo que seguir los siguientes pasos: seleccionar un tamaño de paso (Δx) y una cantidad máxima de iteraciones (n) de manera que solucionaran las ecuaciones aplicando las iteraciones de manera simultáneas en las ecuaciones de solución del Runge-Kutta de cuarto orden hasta conocer el valor final y_n [23].

El ajuste de los parámetros del modelo a los datos experimentales fue logrado con una función objetivo mostrada en la ecuación (10) [24], dicha ecuación nos permite conocer que tan alejados están los valores obtenidos en el modelo de los datos experimentales.

$$J = \sum (P_{experimental} - P_{modelada})^2 \tag{10}$$

$P_{experimental}$: Producción de biogás Experimental.
 $P_{modelada}$: Producción de biogás Modelada.

3. Resultados y discusión

La tabla 4 muestra la data obtenida para la concentración de solidos volátiles y solidos totales,

además se muestra la caracterización de los componentes de alcalinidad y pH los cuales se encuentran dentro de los valores reportados en la literatura, [25].

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de los biosólidos utilizados en el ensayo.

| SV(g/L) | SV(g/L) | Alcalinidad (mg/L) | pH |
|-----------------|---------|--------------------|------|
| Inóculo (LD) | 38.8 | 3,030 | 7.30 |
| Cosustrato (LE) | 53.0 | 7,430 | 6.50 |
| Sustrato (RO) | 31.00 | - | 5.02 |

En los resultados obtenidos se observó una mayor concentración de sólidos volátiles en los lodos espesados, esto se debe principalmente al proceso que son sometidos, el cual consiste en reducir su cantidad de contenido de agua mas no la materia orgánica presente. Aunque, esto varía de acuerdo con las características y condiciones operacionales de las plantas de tratamientos de donde provengan [26].

En los ensayos de relación 1:1 el PBM promedio fue de 1.71 L gSV⁻¹ (Figura 5), mientras que la relación 2:1 produjo un PBM de 5.12 L gSV⁻¹ (Figura 6). Con estos resultados se observa que a producción de metano y de inóculo/sustrato resultó directamente proporcional, indicando que a medida que la relación aumente existirán mayor cantidad de microorganismos para transformar materia orgánica [27].

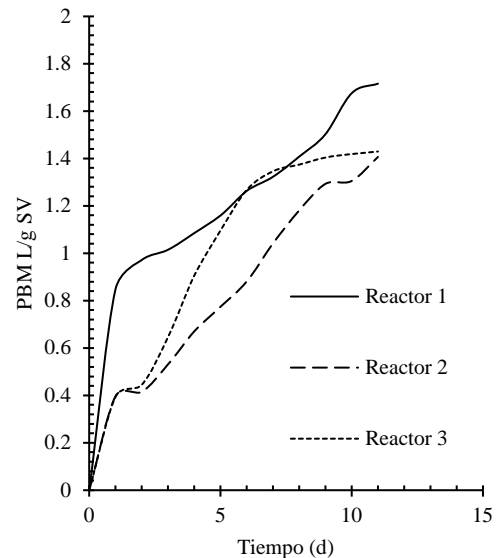


Figura 5. PBM generado para la relación 1:1.

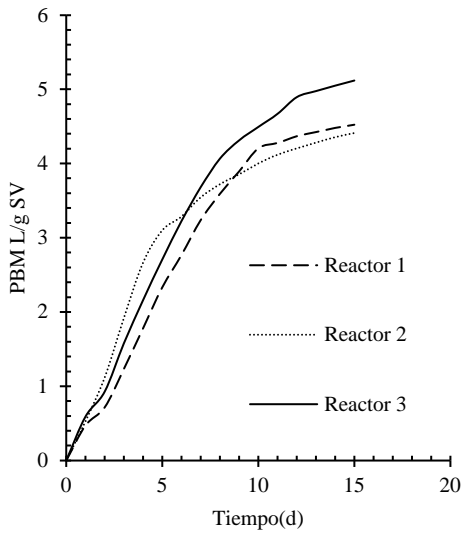


Figura 6. PBM generado para la relación 2:1.

Finalmente, al calcular el volumen de biogás producido se obtuvo que para la relación 1:1 se produjo 0.04 Litros como se muestran la figura 7, mientras que para la relación 2:1 fue de aproximadamente 0.4 Litros, los valores obtenidos para esta relación se muestran en la figura 8. Es así como observa que la relación 2:1 fue más eficiente para la producción de biogás.

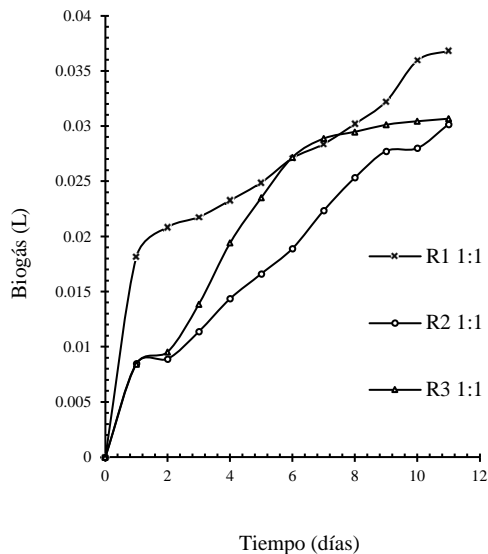


Figura 7. Biogás generado para la relación 1:1.

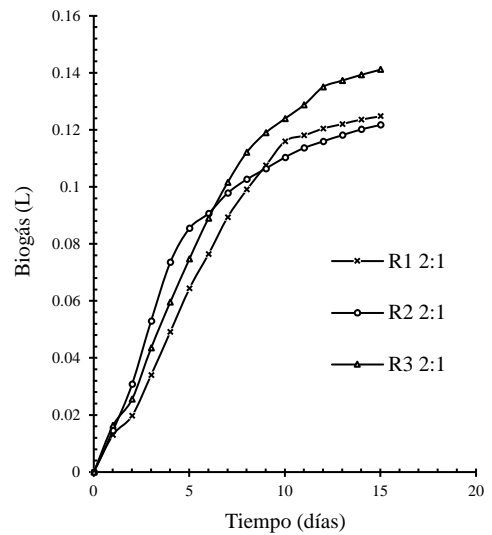


Figura 8. Biogás generado para la relación 2:1.

Para lograr la comparación entre lo modelado y lo experimental y evaluar las variables cinéticas que intervienen en el modelo, el mismo se desarrolló para un periodo de 15 días que fue el tiempo de duración del ensayo, de igual forma se trabajó con una temperatura y pH promedio iguales a los trabajados experimentalmente.

Al ejecutar el modelo con las condiciones similares a las experimentales y los parámetros establecidos de la literatura [18], se obtuvo un modelo que permite observar cómo se da el comportamiento de la digestión anaeróbica (Figura 9), donde a medida que se consume el sustrato la población microbiana aumenta, y paralelo a esto la producción de biogás también incrementa, el resultado de la producción de biogás alcanzada en el modelo fue de 2.52 L.

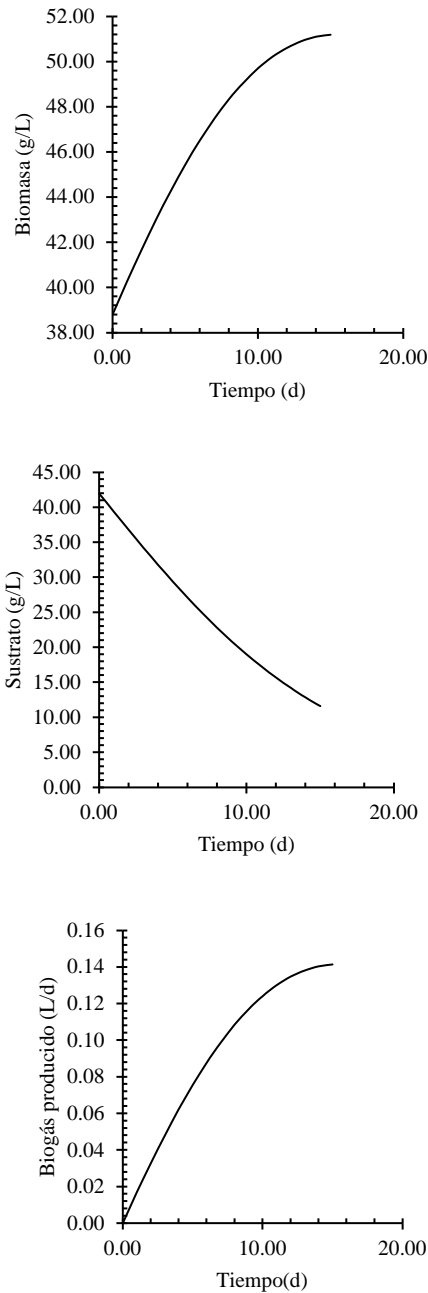


Figura 9. Comportamiento de la Digestión anaeróbica modelado matemáticamente: a) aumento de biomasa; b) reducción de sustrato; c) aumento y estabilización de la producción de biogás

Es importante mencionar que al utilizar una mayor cantidad de ecuaciones y variables cinéticas que representen las condiciones reales, el modelo podrá brindar datos de una producción de biogás más real, en comparación con un modelo más sencillo que de igual manera procure resultados de la DA, empleando el

mismo sustrato. Un caso que demuestra esto, es el modelo desarrollado por Castañeda [10], donde utilizaron una mayor cantidad de parámetros.

La figura 10 muestra la comparación entre los resultados modelados y los obtenidos experimentalmente, donde se observa que existen discrepancias. Esto se debe a que al ser un modelo simplificado y tomando en cuenta que las variables cinéticas empleadas inicialmente son tomadas de la literatura [18], donde éstas no son exactamente las que representan las condiciones del ensayo experimental, el modelo no predice totalmente los datos experimentales.

Es por esta razón que se deben aplicar los ajustes de los parámetros cinéticos que permitan la precisión y confiabilidad en el modelo, logrando resultados similares entre lo experimental y lo desarrollado matemáticamente [28]. De esta manera los parámetros utilizados serán los que mayormente se asemejen a lo desarrollado experimentalmente,

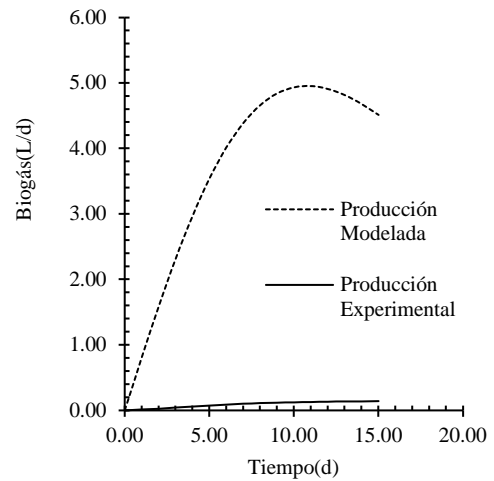


Figura 10. Comparación del modelo matemático con lo desarrollado matemáticamente previo al ajuste. Es notorio la diferencia de los datos experimentales y los modelados

Una vez realizado el ajuste los parámetros evaluados, que mayor modificación tuvieron fueron y_x y μ_{max} , mientras que k_s y k_d menos cambios experimentaron (tabla 5), siendo estos los valores más cercanos a los reales del ensayo experimental, permitiendo que el modelo se asemeje a lo experimental como se muestra en la figura 11.

Tabla 5. Comparación de los parámetros ajustados y los utilizados inicialmente tomados de la referencia [18].

| Parámetros | Inicial | Ajustados |
|-------------|---------|------------|
| μ_{max} | 0.32 | 0.198493 |
| k_s | 150 | 150.000953 |
| k_d | 0.02 | 0.018016 |
| y_{x1} | 0.82 | 0.815983 |
| y_x | 0.27 | 0.011541 |

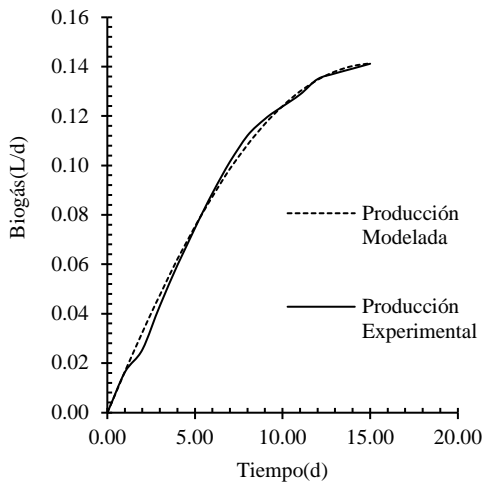


Figura 11. Comparación del modelo matemático ajustado con lo desarrollado matemáticamente

Es importante tener en cuenta que estos parámetros cinéticos son calibrados para la temperatura a la cual se realizó el ensayo de manera tal de hacer la comparación; no obstante, cuando las condiciones operacionales o tipo de sustrato cambian, las cinéticas de los microorganismos también lo hacen, esto se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros cinéticos ajustados a diferentes temperaturas.

| Parámetros | Extraídos de la literatura (A) | Ajustados a 28 °C (B) | Ajustados a 35 °C (C) |
|-------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| μ_{max} | 0.35 | 0.1099 | 0.1985 |
| k_s | 150 | 150.0011 | 150.0009 |
| k_d | 0.02 | 0.0105 | 0.0180 |
| y_{x1} | 0.82 | 0.8382 | 0.8160 |
| y_x | 0.27 | 0.0063 | 0.0115 |

Los resultados muestran que, aunque se esté trabajando a diferentes temperaturas la tasa de muerte de los microorganismos (k_d), se mantiene en valores muy por debajo a los que se obtienen de la tasa de saturación (k_s), observándose una relación inversamente

proporcional entre ambas variables [29], sin embargo, como la literatura [30] lo reporta los valores de k_d disminuyen mucho más cuando solo se utiliza lodos municipales, sin la adición de residuos orgánicos.

Estos resultados se deben mayormente a la velocidad en la que se degrada la materia orgánica, permitiendo ver que los sustratos presentes pueden ser difíciles de degradar [30]. De igual manera, se encontró que las variables cinéticas varían según la temperatura, dado que se identificó que el valor del factor de conversión a biogás (y_x) es directamente proporcional a la temperatura y esto permite alcanzar mayor producción de biogás.

Del mismo modo, se observó que el crecimiento de los microorganismos (μ) también es directamente proporcional con la temperatura, ya que comparando los resultados obtenidos con los reportados en la literatura [15], se observa que existe una gran similitud entre los datos y esto brinda una mayor confiabilidad en las variables cinéticas que intervinieron en el modelo para las condiciones que fue desarrollado.

Es importante indicar que un modelo como el desarrollado en esta investigación, es posible predecir la producción de biogás; pero como se mencionó anteriormente, existirán factores operacionales que intervienen en el proceso de digestión anaeróbica, lo cual generarían cambios en los resultados. Es por ello por lo que se resalta la importancia de tener en cuenta una evaluación profunda del sustrato que se utilizará.

En literaturas analizadas [31], los valores de y_x , k_s y k_d , ajustados en el modelo matemático propuesto no tuvieron variaciones significativas con los valores teóricos establecidos inicialmente. Eso se debe a que utilizaban un sustrato similar al de la fuente de literatura de la cual partieron, no obstante, esto no significa que todo el proceso será idéntico si se usa el mismo sustrato ya que, se evidencia que el valor de μ se duplicó debido a que este presentaba una mayor sensibilidad de ácidos grasos generando dicho resultado.

4. Conclusiones

- El desarrollo del modelo matemático simplificado permite mejorar la eficiencia en la obtención de biogás mediante la digestión anaeróbica, al predecir la cantidad de biogás a producirse y cómo es posible el desarrollo del proceso ante diferentes condiciones de operación y supuestos cinéticos.

- El modelo simplificado podría mejorarse si se usan fórmulas teóricas que involucren la temperatura o medir el pH medido en tiempo real para obtener resultados más precisos.
- La evaluación de las variables cinéticas en el modelo junto a su ajuste a diferentes temperaturas permite definir cuáles condiciones son más eficientes para llevar a cabo la digestión anaeróbica, según determinado sustrato e inóculo. En este sentido, si se desean utilizar los parámetros cinéticos de este modelo, es recomendable usar biosólidos similares a los de esta investigación.
- Es importante tener en cuenta que al ser un modelo simple existe la posibilidad de presentarse condiciones que no han sido tomadas en consideración, las cuales generarían variaciones entre lo modelado y lo experimental. Por lo que es recomendable hacer una revisión previa de las condiciones y componentes a utilizar en su ensayo.

AGRADECIMIENTOS

A los compañeros del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), de la Universidad tecnológica de Panamá y el grupo de investigación Biosólidos: Energía y Sostenibilidad (BioES), por su apoyo incondicional.

Agradecer a CEMCIT-AIP por el apoyo en la administración de fondos del proyecto IDDSE19-008 “Codigestión anaeróbica de biosólidos de aguas residuales y desechos orgánicos municipales como alternativa energética sostenible”, del cual deriva esta investigación.

A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), que mediante el Proyecto IDDSE19-008, nos brindó el apoyo económico para realizar los ensayos experimentales.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

E.O.: Contribuyó en el desarrollo experimental y del modelo, donde desarrollo conceptos claves para realizar la investigación, así como preparación del artículo.

Y.G.: Contribuyó en el desarrollo experimental y del modelo, donde desarrollo conceptos claves para realizar la investigación, así como preparación del artículo.

E.D.: Brindó conocimientos y experiencia en el desarrollo experimental, conceptos claves para realizar la modelación y corrección de artículo final.

M.R.: Brindó conocimientos y experiencia en el desarrollo experimental, conceptos claves para realizar la modelación y corrección de artículo final.

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] R. Vicentin, “Efecto de la recuperación de fangos en plantas de tratamiento de aguas residuales. Balanace energético e impacto ambiental,” San Fé, Argentina, Universidad Nacional Del Litoral, 2017.
- [2] I. Consuelo y J. Guerrero, “Evaluación del Potencial de Bometanización de la co-Digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos,” Medellín, Colombia, Universidad de Antioquia, 2017.
- [3] J. Fernández, “Energías de la Biomasa,” IBERDROLA, 2003.
- [4] L. Hernández-Vásquez, N. Vallejo-Cantú y A. Alvarado-Lassman, “EVALUACIÓN DE LA BIODEGRADABILIDAD DE UN INÓCULO ANAEROBIO PRETRATADO TÉRMICAMENTE,” Renewable Energy, Biomass & Sustainability, vol. 1, n° 1, pp. 65-71, 2019.
- [5] G. M. Ruiz Aguilar y M. G. Delgado Rodríguez, “APROVECHAMIENTO DE LODOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DE IRAPUATO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS,” Memoria de Veranos de investigación científica, pp. 350-354, 2012.
- [6] Y. Lorenzo Acosta y M. C. Obaya Abreu, “La Digestión Anaeróbica, aspectos teóricos,” Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA, n° 1, 2005.
- [7] P. Seruga, M. Krzywonos, E. d. Boer, . Ł. Niedzwiecki, A. Urbanowska y. H. Pawlak-Kruczek, “Anaerobic Digestion as a Component of Circular Bioeconomy—Case Study Approach,” energías, 2023.
- [8] V. Rivera-Salvador, J. S. Aranda-Barradas, T. Espinosa-Solares, F. Robles-Martínez y J. U. Toledo, “The anaerobic digestion model IWA-ADM1: a review of its evolution,” Ingeniería Agrícola y Biosistemas, 2009.
- [9] J. A. Z. Roa, “Modelación matemática de la codigestión anaeróbica entre aguas residuales y lixiviados,” Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2016.

- [10] J. G. Moguel Castañeda, *Modelado y Justificación del proceso de Digestión Anaerobia de desechos Agroindustriales*, Boca del Río, Veracruz: Universidad Veracruzana, 2018.
- [11] M. d. C. e. I. d. Panamá, “Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 47 - 2000,” Panamá, 2000.
- [12] EPA, “Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids, METHOD 1684,” EPA-821-R-01-015, Washington, 2001.
- [13] A. Penttilä, “Initialization of the Oxitop® system for biogas production tests,” TAMK University of Applied Sciences, 2005, p. 42.
- [14] J. Giménez, N. Martí, J. Ferrer y A. Seco, “Methane recovery efficiency in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater: Evaluation of methane losses with the effluent,” EPA, vol. 118, pp. 67-72, 2012.
- [15] V. Ortiz Jordá, “Puesta a punto de una metodología para la determinación de la actividad metanogénica específica (AME) de un fango anaerobio mediante el sistema oxitop Influencia de las principales variables experimentales,” 2011.
- [16] Lina Marcela Cárdenas-Cleves, Brayan Alexis Parra-Orobio, Patricia Torres-Lozada y Carlos Humberto Vásquez-Franco, “Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos,” DOI, 2016.
- [17] N. Kesharwani y. S. Bajpai, “Batch anaerobic co digestion of food waste and sludge: a multi criteria decision modelling (MCDM) approach,” Nature Switzerland, 2020.
- [18] M. Fedailaine, K. Moussi, M. Khitous, S. Abada, M. Saber y N. Tirichine, “Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production,” ELSEVIER, p. 732, 2015.
- [19] L. Seghezzeo y. L. Cardón, “Formulación de un modelo matemático para simular la digestión anaeróbica de efluentes orgánicos de reactores UASB,” Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 2001.
- [20] M. T. Varnero Moreno, *Manual de Biogás*, Santiago de Chile, 2011.
- [21] N. Martí Ortega, *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*, Boca Raton, Florida, 2006.
- [22] L. A. Carrasco Chávez y J. L. Heredia Tiparra, *Sistemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias Lineales no Homogéneas por el Método de Runge Kutta Asistido con Matlab.*, LAMBAYEQUE – PERÚ: Universidad nacional Pedro Luis Gallo, 2020.
- [23] P. Arnaldos Cantero, *Método de Runge Kutta*, Cartagena, Colombia: Universidad Politécnica de Cartagena, 2008.
- [24] J. Morales Rivera, K. Gurubel Tun, E. León Becerril, J. del Real Olvera y V. Zúñiga Grajeda, “Optimización en la producción de metano a partir de aguas,” JEEOS, p. 29, 2019.
- [25] E. Deago, M. Ramírez y E. Vallester, “Evaluación de biosólidos de aguas residuales para producción de biogás: alternativa sostenible del manejo de rellenos sanitarios en Panamá,” Asunción, Paraguay, 2019.
- [26] A. Garcia Garcia, “Co-Digestión Anaeróbica de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales para Producir Biogás. Revisión Sistemática,” Lima- Perú, Universidad César Vallejo, 2021.
- [27] B. A. Parra Orobio, A. Donoso Bravo y. P. Torres Lozada, “Pre dimensioning of Small-Scale Anaerobic Reactors of Food Waste Through Biochemical Methane Potential Assays and Kinetic Models,” BioEnergy Research, 2021.
- [28] E. Valbuena, J. Barreiro, . E. Sánchez, G. Castro, W. Brñez y A. Tovar, “Modelos Cinéticos aplicados al crecimiento de *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* en leche 484-47,” Revista Científica, pp. 464-475, 2005.
- [29] C. Cárdenas, K. Landeta, T. Perruolo, N. Angulo, S. Yabroudi, A. Trujillo y P. Flores, “Determination of kinetic constants for the design of biological treatment dairy effluent in batch of biological treatment dairy effluent in batch of biological system,” Revista Tecnología e Ingeniería, Universidad de Zulia, pp. 11-19, 2014.
- [30] S. Fiotto, “Modelamiento y simulación de reactores secuenciales discontinuos en un proceso de digestión anaeróbica,” Argentina, Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N., 2013.
- [31] B. A. Claudio, H. M. Eliseo, T. Leal Ascencio y H. O. Mendez Acosta, *Modelado matemático de la digestión anaerobia de residuos*, Veracruz, Xalapa: Universidad Veracruzana, 2020.