

Modelación de la generación de metano a partir de suero lácteo y excreta de ganado en codigestión anaerobia

Methane production modelling from cheese whey and livestock excreta anaerobic co-digestion

Héctor López-Aguilar ¹  [0000-0001-7324-1700](https://orcid.org/0000-0001-7324-1700)

Alejandra Barrón ¹

Mariana Franco ¹

Alfonso Paz ¹

Antonino Pérez-Hernández ²  [0000-0002-9486-7072](https://orcid.org/0000-0002-9486-7072)

¹ Universidad La Salle de Chihuahua

² Centro de Investigación de Materiales Avanzados  antonino.perez@cimav.edu.mx
© Universidad De La Salle Bajío (México)

Palabras clave: biodigestor; residuo; inóculo; biomasa; Gompertz; Richards; exponencial; biometano; biodigestión; sigmoidal; BMP; biogás

Keywords: biodigester; waste; inoculum; biomass; Gompertz; Richards; exponential, biomethane; biodigestion; sigmoidal; BMP; biogas

Recepción: 06 – 01 – 2021 / Aceptación: 20 – 07 – 2021

Resumen

Introducción: la producción de biogás es una alternativa sostenible para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos. Esta investigación presenta el estudio y modelación de la producción de biogás, generada por la codigestión de excreta de vaca y suero de leche.

Método: se realizaron experimentos de Digestión Anaerobia (DA), utilizando reactores herméticos, a temperatura ambiente monitoreados por 75 días consecutivos con base en el método de potencial bioquímico de metano (BMP). Se utilizaron los modelos logísticos: exponencial de crecimiento máximo Gompertz y Richards modificados para representar la cinética del fenómeno de producción de metano.

Resultados y discusiones: se determinó la tasa máxima de producción de metano, la duración de la fase lag, y el potencial de producción de metano acumulado. Se comparó la suma de cuadrados residual y el coeficiente de correlación para identificar el modelo matemático que mejor describe el fenómeno. Se encontró que existe un potencial para la generación de biogás y el aprovechamiento de los residuos experimentados en codigestión.

Conclusiones: la experimentación y modelación matemática permitió describir el fenómeno de la producción de biogás, con residuos de la industria láctea y de los sistemas pecuarios. Los resultados de la investigación presentan el potencial de incentivar la producción de energía, en el sector agropecuario regional, a partir de la tecnología DA aprovechando los residuos de la industria láctea bajo el concepto de economía circular.

Abstract

Introduction: the production of biogas is a sustainable alternative for the energy use of organic waste. This investigation presents the study and modeling of biogas production, generated by the co-digestion of livestock excreta and cheese whey.

Method: Anaerobic Digestion (DA) experiments were carried out, using hermetic reactors, at room temperature monitored for 75 consecutive days based on the biochemical methane potential (BMP) method. The logistic models were used: exponential maximum growth, Gompertz and Richards modified to represent the kinetics of the methane production phenomenon.

Results and discussions: the maximum methane production rate, the duration of the lag phase, and the accumulated methane production potential were determined. The residual sum of squares and the correlation coefficient were compared to identify the mathematical model that best describes the phenomenon. It was found that there is a potential for the generation of biogas and the use of the residues experienced in this work in co-digestion.

Conclusions: experimentation and mathematical modeling allowed to describe the phenomenon of biogas production, with residues from the dairy industry and livestock systems. The results of the research show the potential to incentivize energy production in the regional agricultural sector, based on DA technology, taking advantage of the dairy industry waste under the concept of circular economy.

Introducción

La disposición inadecuada de los residuos ganaderos ocasiona daños graves al medio ambiente, como la contaminación del agua, suelo y aire, lo que puede reducir la calidad de vida (Abouelenien *et al.*, 2010). La Digestión Anaerobia (DA) es una alternativa de disposición de los residuos orgánicos, provenientes de establos y granjas para la producción de biogás, que además de reducir

la contaminación mitiga la emisión de los gases de efecto invernadero. Su aplicación representa una oportunidad económica, para los productores agropecuarios, ya que se pueden utilizar los efluentes sólidos y líquidos de la DA como fertilizantes (Castrillón *et al.*, 2011). El uso de la DA como método de tratamiento tiene múltiples beneficios, incluida su aplicación a pequeña y gran escala, en la generación de un combustible gaseoso multifacético que se puede emplear como recurso energético renovable, entre otros (Ware y Power, 2017).

El biogás es producto de la DA, donde los materiales orgánicos son descompuestos por las bacterias en condiciones anaeróbicas, es una mezcla de metano (60-70 %), dióxido de carbono (40-30 %), y otros gases como el sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco, nitrógeno, hidrógeno y compuestos orgánicos (Magaña-Ramírez *et al.*, 2011). El uso del biogás mitiga emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en comparación con las referencias fósiles (Lovrenčec *et al.*, 2011). Se ha encontrado que la producción de biogás y su uso para la obtención de energía es una opción viable (Muthu *et al.*, 2017).

La DA de las excretas pecuarias es una práctica común; sin embargo, el bajo rendimiento en la generación de biogás puede obstaculizar la rentabilidad de los sistemas de pequeña escala. Para superar esto se ha encontrado que se logra un aumento en el rendimiento de biogás, mediante la codigestión del estiércol animal con otros sustratos (Imeni *et al.*, 2019, Almomani y Bhosale, 2020). Por su parte, Navarro *et al.* (2014) determinaron que el uso de suero lácteo es más eficiente que el uso de agua como disolvente en la DA ya que se logran alcanzar niveles de producción de biogás más altos en menor tiempo. Sin embargo, se ha encontrado que debido a la alta carga orgánica y la baja alcalinidad la monodigestión del suero lácteo, puede resultar en la acumulación de ácidos grasos volátiles lo que conduce a la acidificación e inhibición de la actividad metanogénica (Asunis *et al.*, 2020). Carlini *et al.* realizaron experimentación de Codigestión Anaerobia (CoDA) de suero lácteo residual y excreta de aves de corral, descubrieron que el uso de estos residuos podría representar una posibilidad económicamente atractiva para las granjas que generan estos residuos (Carlini *et al.*, 2015). Similarmente, Fernández-Rodríguez *et al.* llevaron a cabo la comparación y evaluación de la DA y CoDA, de diferentes mezclas de lecho de paja de cabra y suero de queso de cabra. Encontraron que la tasa máxima de producción de metano disminuyó cuando la cantidad de suero en la mezcla aumentó, y a partir de utilizar un modelo sigmoidal para describir la cinética del proceso, identificaron que el valor más bajo para la

producción máxima de metano se presentó con el suero en monodigestión (Fernández-Rodríguez *et al.*, 2021).

Así también, algunos investigadores llevaron a cabo modelos matemáticos en sus estudios para obtener parámetros cinéticos de la DA (Zwietering *et al.*, 1990; Altaş, 2009; Li *et al.*, 2012; Ware y Power, 2017; Nguyen *et al.*, 2019; Almomani y Bhosale, 2020; Pererva *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2020; Elagroudy *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020). Los modelos matemáticos generalmente se refieren a la forma algebraica canónica, con coeficientes adimensionales, o se basan en ecuaciones que describen la dependencia de la velocidad de las reacciones químicas en función de la concentración de sustrato (Pererva *et al.*, 2020). Se ha encontrado que, para mejorar el rendimiento de los digestores y el conocimiento del proceso, se requiere un modelado dinámico adecuado de la DA (Elagroudy *et al.*, 2020).

El objetivo de este trabajo fue la experimentación de la codigestión anaerobia de suero de leche y excreta de ganado, para la producción de biogás, en reactores prototipo experimentales a temperatura ambiente y la modelación matemática de la cinética de este fenómeno. Se utilizaron, dos modelos matemáticos para ajustar los datos experimentales y evaluar la tasa de producción de metano. Es la intención de este trabajo, que la información obtenida, propicie el aprovechamiento de los residuos de la industria láctea como parte de una cadena de valor económico.

Materiales y métodos

Se utilizaron las biomásas residuales de excreta de ganado bovino proveniente del rancho “La Loma” en Camargo Chihuahua (27.663638" N -105.179961" W) y suero lácteo o de leche, residuo de la elaboración del queso tipo Chihuahua, de la quesería *La Tarahumara* (27° 37' 25.2" N -105° 14' 55.4" W) localizada en Camargo, Chihuahua, México. Los principales componentes de este subproducto, de la industria láctea, son lactosa, proteínas y sales minerales (Navarro *et al.*, 2014). Se utilizó inóculo previamente adaptado, obtenido de un experimento de DA con los sustratos: suero lácteo y excreta de vaca. El experimento tuvo un periodo de 170 días, en un digestor anaerobio experimental con capacidad de 100 L en condiciones secas (37 % de humedad), el cual presentó un tiempo de adaptación o fase lag de más de 120 días con una producción máxima de 23.6 cm³ CH₄/g SV, atendiendo la metodología de potencial bioquímico de metano (BMP) (Peña, 2021).

La excreta de vaca fue recolectada en bolsas de polipropileno, el suero de leche fue recolectado en la quesería por medio de recipientes de 2 litros de polietileno para posteriormente ser llevadas las muestras al laboratorio.

Los sólidos volátiles (SV) de las muestras de las biomasas fueron caracterizadas de acuerdo con el Standard Method 2540 E (APHA, 2005) utilizando una balanza de alta precisión modelo PCE-ABT 220L y un horno FELISSA.

Se construyeron dos prototipos de biodigestores en lote a escala experimental, con recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE), con capacidad de 20 Litros. Cada sistema DA fue cerrado con tapa y empaque, se utilizó tubo PVC para unir el interior del biodigestor con la válvula de esfera para el cerrado y un manómetro para medir la presión del biogás producido (fig. 1). Las mediciones de las concentraciones de los gases CH₄, CO₂, O₂, H₂S fueron realizadas periódicamente, con una Sonda Landtec modelo 5000, cada que los sistemas alcanzaron una presión interna de 4 psi. Se utilizó un medidor de diafragma KG2 marca Keuk Dong, con una capacidad de caudal máximo de 2 m³/h y presión máxima de 50 kPa, para medir el volumen de biogás producido. La DA en los prototipos experimentales se realizó en un ambiente exterior, durante el otoño del 2020, la mediana de las temperaturas ambiente máxima y mínima fueron 27 ° y 7° C.

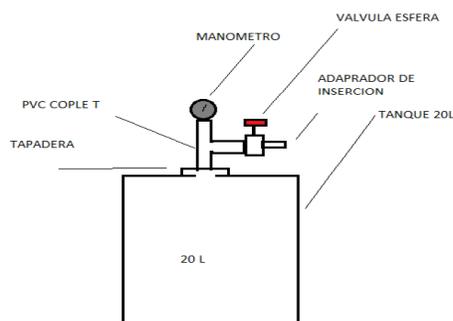


Fig. 1. Reactor experimental de 20 litros de HPDE.

Fig. 1. 20 liter HPDE experimental reactor.

Se buscó mantener una composición del sustrato y el inóculo (S:I) 1:1, en ambos sistemas experimentales. Ya que se ha encontrado que para sustratos menos degradables, como la materia orgánica lignocelulósica presente en la excreta animal, se recomienda aplicar una relación S:I menor o igual a uno (Carlini *et al.*, 2015; Holliger *et al.*, 2016). Los componentes de las mezclas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Componentes de los sistemas DA experimentales [Kg].
Table 1. Components of the experimental DA systems [Kg].

Reactor	Excreta	Suero de leche	Agua	Inóculo
R1	4	2	2	6
R2	3	3	2	6

Los ensayos BMP proporcionan información específica sobre: la degradación anaerobia del sustrato, como la rapidez con la que se puede degradar, además de la cantidad máxima de metano que se genera por unidad de masa (Ware y Power, 2017).

Con base en la metodología BMP se midió el volumen de CH₄, producido por masa de SV de los sustratos en iguales condiciones experimentales, en un periodo de 75 días periodo en que se detectó que la producción de biogás tendió a cero en los sistemas experimentales.

Se utilizó el método Levenberg-Marquardt, en el software CurveExper Professional 2.6.5, para resolver las regresiones no lineales, realizar el ajuste de los datos experimentales y representar el comportamiento cinético de la producción de metano.

Se llevó a cabo el uso del modelo de aumento exponencial máximo, el cual se obtiene con base en la ecuación de primer orden para estimar el rendimiento de biogás (Elagroudy *et al.*, 2020). Se usó también el modelo de Gompertz el cual supone que la tasa de producción de gas es proporcional a la actividad microbiana, y el parámetro de proporcionalidad disminuye con el tiempo, siguiendo una cinética de primer orden, lo que puede atribuirse a una pérdida de eficiencia de la tasa de fermentación con el tiempo (Altaş, 2009). La función de Gompertz es similar a la función de crecimiento logístico, pero se diferencia de ella en que es asimétrica. El modelo Gompertz es el más comúnmente aplicado para describir la cinética de la DA (Pečar y Goršek, 2020). El modelo de Richards, se relaciona con el modelo de Gompertz, ya que es una generalización del modelo logístico (Altaş, 2009).

Se utilizaron los modelos modificados Gompertz y Richards (Zwietering *et al.*, 1990), para determinar valores asociados al metabolismo microbiano de la DA, por la relación que guarda sus ecuaciones diferenciales a la tasa de cambio en la producción de biogás observado.

En el modelo de aumento exponencial máximo, de la tabla 2, “a” es el acumulado de rendimiento de metano, y el coeficiente de tasa de hidrólisis “B” es el factor limitante para el proceso de biodegradación anaeróbica (Elagroudy *et al.*, 2020).

En los modelos Gompertz y Richards modificados (tabla 2) la tasa máxima de producción de biogás “b” está dada por la pendiente de la línea tangente al punto de inflexión, ya que no se forma gas durante la fase lag (Pererva *et al.*, 2020). El tiempo de la fase lag “c” es la intersección del eje x de esta pendiente. Los rendimientos máximos acumulados de biogás “a” es la intersección del eje y del punto más alto de la curva (Ware y Power, 2017). El cuarto parámetro en el modelo Richards, es un parámetro de forma y es difícil de explicar biológicamente (Zwietering *et al.*, 1990).

Tabla 2. Modelos sigmoidales utilizados.**Table 2.** Sigmoidal models used.

Modelo	Ecuación	No. variables
Aumento exponencial máximo	$y = a * [1 - e^{(-B*x)}]$	2
Gompertz modificado	$y = a * e^{-e^{\left(\frac{b*e}{a}\right)*(c-x)+1}}$	3
Richards modificado	$y = a * \left\{ 1 + D e^{(1+D)} e^{\left[\frac{b}{a}(1+D)\left(1+\frac{1}{D}\right)(c-x)\right]} \right\}^{-\frac{1}{D}}$	4

Para seleccionar el mejor ajuste de modelo, entre los modelos considerados, se comparó la suma de cuadrados residual resultante de las ecuaciones para cada uno de los casos experimentales. La suma de cuadrados residual, permitió medir la variación de los errores de modelado. Así también se consideró el coeficiente de determinación o coeficiente de correlación (R^2) para determinar la correlación del modelo con los datos experimentales (Tian *et al.*, 2020), donde un valor de R^2 cercano a 1 implica un mejor ajuste del modelo.

Resultados y discusiones

En las tablas 3 y 4 se presentan los resultados del monitoreo de los reactores experimentales R1 y R2, respectivamente.

Tabla 3. Resultados experimento R1.

Table 3. Results of experiment R1.

Día	2	23	30	39	55	75
% CH ₄	2.2	21.2	22.6	25.7	31.5	27.6
% CO ₂	53.8	74	74.8	71.4	62.6	66.9
% O ₂	4.4	0.4	6	0.6	0.6	0.6
ppm H ₂ S	68	6196	8505	>9999	>9999	>9999

En la tabla 3, se encontró que el porcentaje de metano aumentó de manera creciente hasta el día 55, finalmente decreció en la última medición el día 75, alcanzando un máximo de 31.5 %. La concentración de H₂S en el biogás superó las 9,000 ppm a partir del día 39. Al día 75 se produjeron un acumulado de 10.74 cm³ CH₄/g SV en el sistema R1.

Tabla 4. Resultados del experimento R2.

Table 4. Results of experiment R2.

Día	2	6	12	13	15	22	29	35	41	75
% CH ₄	0.9	5	12.5	12.8	42.5	17.3	18.3	19.4	25.4	22.7
% CO ₂	61.4	74	79.5	81.5	48.2	78.5	76.9	75.9	70.5	67.5
% O ₂	3.2	2.1	0.5	0.4	7.6	0.5	0.7	0.8	1.1	0.8
ppm H ₂ S	356	464	2247	3961	5500	9440	>9999	>9999	>9999	>9999

En la tabla 4, se muestra que la producción de metano disminuyó significativamente a partir del día 22, alcanzando el máximo de 42.5 % el día 15. Así mismo muestra que, a partir del día 22 la concentración de H₂S superó las 9,000 ppm, se identificó que el incremento de H₂S afecta directamente reduciendo la producción de metano sin llegar a inhibir el proceso DA. Se ha identificado que la mayoría de los motores convencionales utilizados para la generación combinada de calor y energía necesitan biogás con niveles de H₂S por debajo de 700 ppm, para evitar una corrosión excesiva y un deterioro rápido y costoso del aceite lubricante. (Al Seadi, 2008).

Al final del monitoreo de 75 días el sistema R2 presentó una producción acumulada de 15.57 cm³ CH₄/g SV. Se encontró que el sistema R2, con respecto al sistema R1, produjo 44.97 % mayor cantidad de metano al final del periodo de monitoreo. Sin embargo, los resultados encontrados fueron inferiores comparados con los encontrados en la literatura: Mosey *et al.* (2015) determinaron en condiciones de laboratorio valores de 333.9, 283.8, 246.3 y 210.9 cm³ CH₄/g SV para las biomásas en monodigestión: celulosa, ensilado de maíz, paja de trigo y excreta de ganado, respectivamente, en reactores de 500 ml de capacidad.

En la propuesta experimental de *Fernández-Rodríguez et al.* en la CoDA de mezclas de lecho de paja de cabra y suero de queso de cabra en reactores de 250 ml registraron valores en el rango de 423-274 cm³CH₄/g SV. Similarmente, *Almomani y Bhosale (2020)* determinaron una producción de 297.99 cm³CH₄/g SV en la CoDA de residuos sólidos agrícolas y excreta de vaca en condiciones controladas en reactores de 2.5 litros. Por su parte, *Carlini et al. (2015)* obtuvieron 223 cm³CH₄/g SV en reactores de 5 L de CoDA de suero lácteo residual y excreta de aves de corral. Los autores asocian la menor producción de biometano, de los sistemas experimentales, con el escalamiento del tamaño de los reactores ya que se utilizaron sistemas biodigestores de 20 litros de capacidad. Así como a la variación de la temperatura ambiental durante la experimentación, los experimentos de DA se realizaron en un ambiente exterior, donde la mediana de las temperaturas ambiente máxima y mínima fueron 27° y 7° C, respectivamente.

A partir de los valores experimentales de la producción de metano se realizó el ajuste de los modelos: de crecimiento exponencial máximo, Gompertz y Richards modificados. En la tabla 5 se presentan los parámetros del ajuste de los modelos, donde:

- El coeficiente “a” [cm³ CH₄/g SV] representa el valor máximo de producción de metano.
- El coeficiente “b” [cm³ CH₄/g SV] la tasa máxima de producción de metano.
- El coeficiente “c” [días] es el tiempo de la fase lag.
- El coeficiente “B” [1/días] es la tasa de hidrólisis constante.
- El coeficiente “D” [adimensional] es un parámetro de forma de la curva sigmoidal

Tabla 5. Parámetros de ajuste de los Modelos: exponencial máximo, Gompertz y Richards modificados.
Table 5. Model fitting parameters: maximum exponential, modified Gompertz and Richards.

Exp.	Modelos matemáticos								
	Exponencial máximo		Gompertz modificado			Richards modificado			
	a	B	a	b	c	a	b	c	D
R1	33.0936	0.0048	11.1056	0.2793	16.4256	10.8173	0.9065	-96.6567	10.16
R2	17.1767	0.0032	15.4574	0.5448	4.9095	15.3887	0.4962	3.0994	1.0377

El ajuste del modelo de crecimiento exponencial máximo, presentó un coeficiente de correlación de 0.9529 y 0.9008 para R1 y R2, respectivamente.

El ajuste del modelo Gompertz modificado, para los experimentos R1 y R2, presentó un coeficiente de correlación de 0.9984 y 0.9581 respectivamente. Mientras que del ajuste del modelo

Richards modificado, mostró un coeficiente de correlación de 0.9954 y 0.9477 para los respectivos experimentos. En la regresión, la suma total de los cuadrados permite expresar la variación total de la producción de metano. En el modelo de crecimiento exponencial se determinó una suma de cuadrados residual de 6.1230 y 21.403 para R1 y R2, respectivamente.

El modelo Gompertz modificado presentó una suma de cuadrados residual de 0.2002 y 9.0308 para R1 y R2. Así también, se calculó la suma de cuadrados residual para el modelo Richards modificado de 0.5913 y 11.2729 para R1 y R2, respectivamente.

Del análisis comparativo se identificó que la mejor regresión fue la del modelo Gompertz modificado, para ambos experimentos, ya que presentó un mayor R^2 y un valor menor de la suma de cuadrados residual.

Un resultado principal de los ensayos BMP, son las curvas de producción acumulativa de metano, donde la producción acumulada de metano se representa en función del tiempo (Ware y Power, 2017). En la fig. 2 se presentan los valores experimentales y los modelos de ajuste para el ensayo del Reactor R1.

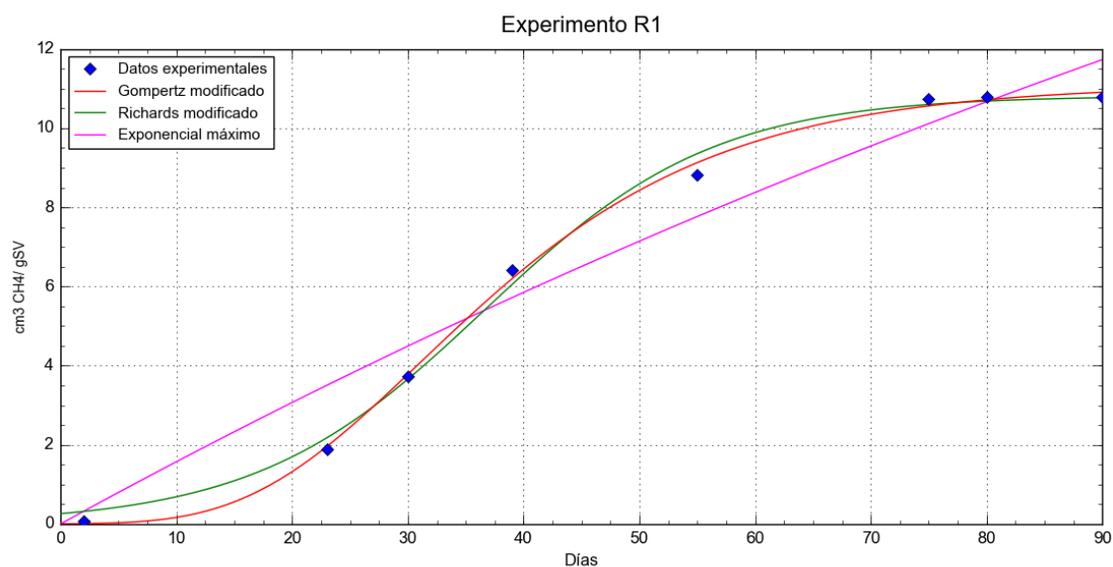


Fig. 2. Valores experimentales y modelos de ajuste R1.

Fig. 2. Experimental values and fit models R1.

En la fig. 3 se presentan los valores experimentales y los modelos de ajuste para el Reactor 2.

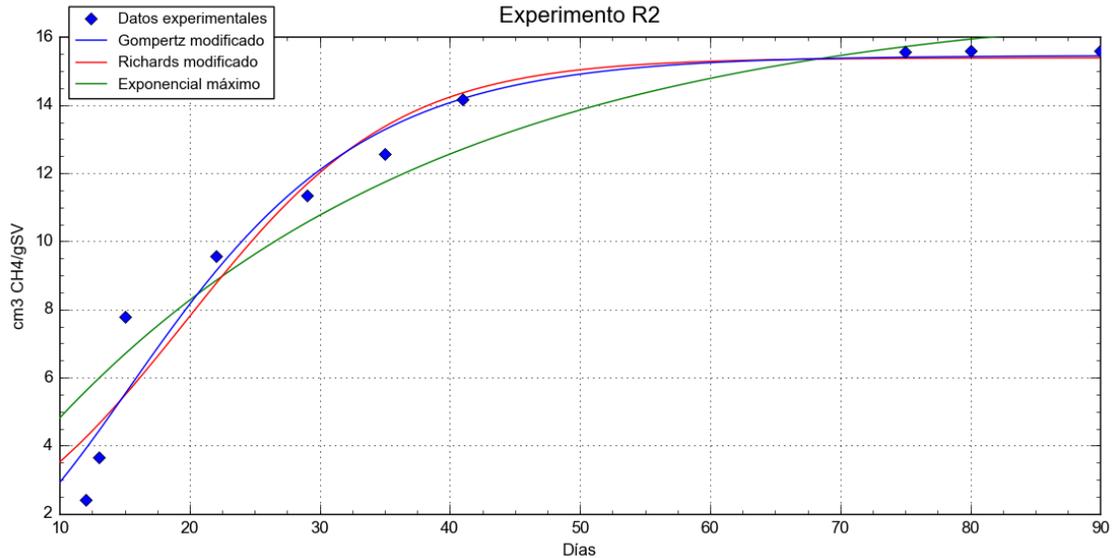


Fig. 3. Valores experimentales y modelos de ajuste R2.

Fig. 3. Experimental values and fit models R2.

En el experimento R1: el modelo Richards modificado, pronosticó los valores experimentales al día 75 con un error de 0.157 %; mientras que el modelo Gompertz modificado sobrestimó la producción acumulada de metano de 2.824 % respecto a los valores experimentales. El modelo de crecimiento exponencial, demostró ser un modelo que no refleja al fenómeno, sobrecalculó más de 200 % comparado con el valor experimental.

Comparando con los valores experimentales del experimento R2 el modelo Gompertz modificado demostró una mejor predicción para la producción acumulada de metano de 99.083 %, el modelo Richards del 98.641 % mientras que el modelo de crecimiento exponencial máximo sobrecalculó el valor 10.102 % respecto el valor experimental al día 75.

Los resultados obtenidos coinciden con *Zhao et al. (2019)* al identificar que una zona lag más corta, se asocia a un mayor potencial de la DA. El tiempo de la zona lag: obtenida para el experimento R1, con el modelo Gompertz fue de 16 y medio días; mientras que con el modelo Richards, no permitió que se calcularan valores reales válidos. Debido a las condiciones experimentales y de monitoreo de los sistemas sólo se pudo determinar el tiempo lag entre un rango de 2 y 23 días. Para el experimento R2 se encontró alrededor del día 5 con el modelo Gompertz y del día 3 con el modelo Richards. En el experimental se determinó entre los días 2 y 6 por lo que los valores calculados se encuentran dentro del rango esperado.

El modelo más sencillo de 2 variables presentó valores sobrecalculados de 10 % para la producción acumulada del sistema DA con región lag corta y de más de 200 % para el sistema con mayor zona lag. La diferencia en el tiempo de adaptación de los sistemas DA podría estar relacionada con la cantidad de humedad presente ya que el sistema R2 contiene mayor cantidad de suero de leche y por lo tanto mayor cantidad de agua. Se ha encontrado un mayor rendimiento de metano en sistemas experimentales con una mayor presencia de humedad (Aghdam *et al.*, 2017; Náthia-Neves *et al.*, 2018).

Los resultados obtenidos con el modelo Richard, que ha demostrado buenos ajustes y predicción en sistemas de fermentación que inician sin un inóculo especializado y adaptado, fueron deficientes en la predicción del tiempo de duración de la zona lag de manera correcta.

De acuerdo con los resultados de diversos autores, el modelo de Gompertz modificado funcionó mejor al ajustar los resultados experimentales describiendo el fenómeno de mejor manera (Zwietering *et al.*, 1990; Tian *et al.*, 2020; Almomani y Bhosale, 2020; Elagroudy *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2020) y permitió calcular parámetros de importancia para el escalamiento y diseño de sistema DA. La cinética de la DA es importante para diseñar digestores y predecir el comportamiento de sistemas anaeróbicos, así como para optimizar y escalar a fermentadores reales (Pečar y Goršek, 2020).

Además de las conclusiones extraídas de los resultados experimentales, se puede eludir un valioso discernimiento del comportamiento específico de los sustratos probados para permitir evaluaciones más precisas y propiciar el aprovechamiento de los sustratos (Ware y Power, 2017). Así también, se demostró que utilizar un inóculo aclimatado al sustrato y las condiciones de operación es beneficioso para la DA, ya que de acuerdo con Kong *et al.* (2016) se presenta una mayor biodegradabilidad y una mayor producción de metano.

Conclusiones y recomendaciones

En este artículo se estudió experimentalmente la codigestión de excreta de vaca y suero de leche en reactores de 20 litros expuestos al medio ambiente durante el otoño, utilizando modelos matemáticos para representar la cinética de la producción de metano. La experimentación y modelación matemática permitió describir el fenómeno de la producción de biogás con residuos de la industria láctea y los sistemas pecuarios.

Se concluye que el reactor R2 presentó una mayor generación de metano, 44.97 % mayor que el R1, lo cual podría estar asociado a la cantidad de humedad presente en el sistema. Sin embargo, los valores fueron bajos comparados con lo encontrado en la literatura en reactores de menor tamaño.

Se determinaron altas concentraciones de H₂S, en las condiciones experimentales descritas, por lo que se recomienda el uso de sistemas de filtración para el correcto aprovechamiento del biogás.

El modelo de Richards, presenta una deficiente predicción en la fase lag, esto es posible atribuirlo a que el sistema arranca con un inóculo especializado y adaptado. Se concluye que la predicción en el comportamiento de los sistemas productores de biogás, dependerá de los modelos matemáticos y que estos consideren las condiciones de arranque, si se cuenta o no con un inóculo especializado y adaptado, además de su natural dependencia a las condiciones ambientales.

El modelo Gompertz modificado permitió describir de mejor manera el proceso de digestión anaerobia de los sustratos suero lácteo y excreta pecuaria en codigestión, permitiendo calcular la tasa máxima de producción de metano, el tiempo lag, además de la producción máxima acumulada de metano. Se identificó también, la importancia del inóculo adaptado, ya que la implementación demostró reducir la zona lag considerablemente.

Los resultados de la investigación presentan el potencial de incentivar la producción de energía en el sector agropecuario regional, a partir de la tecnología DA aprovechando los residuos de la industria láctea bajo el concepto de economía circular. Se recomienda evaluar el digestato para identificar si puede ser utilizado como mejorador de suelos o alimento para ganado.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación en Materiales Avanzados S. C. (CIMAV); y a la Universidad La Salle de Chihuahua. A los proyectos: CONACYT-SENER N°243715 y CONACYT-SEMAR N°305292 por su apoyo a la generación de infraestructura y laboratorios. Así como al laboratorio de Energías Alternativas de la ULSA por su colaboración. *Indivisa Manent.*

Referencias

- Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., Nishio, N. y Nakashimada, Y. (2010). Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. *Bioresource technology*, 101(16), 6368-6373. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.071>
- Asunis, F., De Gioannis, G., Dessì, P., Isipato, M., Lens, P. N., Muntoni, A. y Spiga, D. (2020). The dairy biorefinery: integrating treatment processes for cheese whey valorisation. *Journal of Environmental Management*, 276, 111240. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111240>
- Aghdam, E. F., Scheutz, C. y Kjeldsen, P. (2017). Assessment of methane production from shredder waste in landfills: The influence of temperature, moisture, and metals. *Waste Management*, 63, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.023>
- Al Seadi, T. (2008). *Biogas handbook*. (2008 ed.) Syddansk Universitet.
- Altaş, L. (2009). Inhibitory effect of heavy metals on methane-producing anaerobic granular sludge. *Journal of hazardous materials*, 162(2-3), 1551-1556. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.048>
- Almomani, F. y Bhosale, R. (2020). Enhancing the production of biogas through anaerobic co-digestion of agricultural waste and chemical pre-treatments. *Chemosphere*, 126805. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126805>
- APHA, A. (1999). WEF-Method 2540 E—Fixed and volatile Solids Ignited at 550 C. Standard Methods for the examination of water and wastewater Washington.
- Carlini, M., Castellucci, S. y Moneti, M. (2015). Biogas production from poultry manure and cheese whey wastewater under mesophilic conditions in batch reactor. *Energy Procedia*, 82, 811-818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.817>
- Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ormaechea, P. y Marañón, E. (2011). Optimization of biogas production from cattle manure by pre-treatment with ultrasound and co-digestion with crude glycerin. *Bioresource technology*, 102(17), 7845-7849. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.05.047>
- Elagroudy, S., Radwan, A. G., Banadda, N., Mostafa, N. G., Owusu, P. A. y Janajreh, I. (2020). Mathematical models comparison of biogas production from anaerobic digestion of

- microwave pretreated mixed sludge. *Renewable Energy*, 155, 1009-1020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.166>
- Fernández-Rodríguez, M. J., Puntano, N. F., Mancilla-Leytón, J. M. y Borja, R. (2021). Batch mesophilic anaerobic co-digestion of spent goat batch mesophilic anaerobic co-digestion of spent goat straw bedding and goat cheese whey: Comparison with the mono-digestion of the two sole substrates. *Journal of Environmental Management*, 280, 111733. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111733>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., de Laclos, H.F., Ghasimi, D.S.M., Hack, G., Hartel, M., Heerenklage, J., Horvath, I.S., Jenicek, P., Koch, K., Krautwald, J., Lizasoain, J., Liu, J., Mosberger, L., Nistor, M., Oechsner, H., Oliveira, J.V., Paterson, M., Pauss, A., Pommier, S., Porqueddu, I., Raposo, F., Ribeiro, T., Rüscher, F., Strömberg, S., Torrijos, M., van Eekert, M., van Lier, J., Wedwitschka, H. y Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Sci. Technol.* 74, 2515–2522. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2016.336>.
- Imeni, S. M., Pelaz, L., Corchado-Lopo, C., Busquets, A. M., Ponsá, S. y Colón, J. (2019). Techno-economic assessment of anaerobic co-digestion of livestock manure and cheese whey (Cow, Goat & Sheep) at small to medium dairy farms. *Bioresource technology*, 291, 121872. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121872>
- Kong, X., Xu, S., Liu, J., Li, H., Zhao, K. y He, L. (2016). Enhancing anaerobic digestion of high-pressure extruded food waste by inoculum optimization. *Journal of environmental management*, 166, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.002>
- Li, L., Kong, X., Yang, F., Li, D., Yuan, Z. y Sun, Y. (2012). Biogas production potential and kinetics of microwave and conventional thermal pretreatment of grass. *Applied biochemistry and biotechnology*, 166(5), 1183-1191. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9503-9>
- Li, W., Khalid, H., Amin, F. R., Zhang, H., Dai, Z., Chen, C. y Liu, G. (2020). Biomethane production characteristics, kinetic analysis, and energy potential of different paper wastes in anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 157, 1081-1088. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.035>

- Lovrenčec, L., Sraka, S., Sinergija, R. A., Yavachev, L., Adamescu, E. M. y Grup, T. (2011). IEE Project 'BiogasIN'.
- Magaña-Ramírez, J. L., Rubio-Núñez, R., Jiménez-Islas, H. y Martínez-García, M. T. (2011). Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra. *Ingeniería e investigación*, 31(1), 93-98. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64321170011>
- Moset, V., Al-zohairi, N. y Møller, H. B. (2015). The impact of inoculum source, inoculum to substrate ratio and sample preservation on methane potential from different substrates. *Biomass and Bioenergy*, 83, 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.018>
- Muthu, D., Venkatasubramanian, C., Ramakrishnan, K. y Sasidhar, J. (2017). Production of biogas from wastes blended with cowdung for electricity generation-a case study. *IOP Conf. Series, Earth Environ. Sci*, 80(1). 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/80/1/012055>
- Náthia-Neves, G., Berni, M., Dragone, G., Mussatto, S. I. y Forster-Carneiro, T. (2018). Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(9), 2033-2046. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1682-2>
- Navarro, S. L. B., Lanuza, D. S. Z., Ramírez, J. C. A. y Calero, J. A. Z. (2014). Evaluación de la producción de biogás a partir de suero lácteo a escala de laboratorio. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 4(1), 29-35. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v4i1.8633>
- Nguyen, D. D., Jeon, B. H., Jeung, J. H., Rene, E. R., Banu, J. R., Ravindran, B. y Chang, S. W. (2019). Thermophilic anaerobic digestion of model organic wastes: Evaluation of biomethane production and multiple kinetic models analysis. *Bioresource technology*, 280, 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.033>
- Peña Kevin (2021). *Producción de biogás a partir de residuos domésticos*. Tesis de grado (Ingeniero en Energías Alternativas). Universidad La Salle Chihuahua. Depto. de Ingeniería. Chihuahua, Chihuahua, México.
- Pererva, Y., Miller, C. D. y Sims, R. C. (2020). Existing Empirical Kinetic Models in Biochemical Methane Potential (BMP) Testing, Their Selection and Numerical Solution. *Water*, 12(6), 1831. <https://doi.org/10.3390/w12061831>
- Pečar, D. y Goršek, A. (2020). Kinetics of methane production during anaerobic digestion of chicken manure with sawdust and miscanthus. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105820. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105820>

- Tian, Y., Yang, K. y Zheng, L. (2020) Modelling Biogas Production Kinetics of Various Heavy Metals Exposed Anaerobic Fermentation Process Using Sigmoidal Growth Functions. *Waste Biomass Valor*, 11, 4837–4848. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00810-x>
- Ware, A. y Power, N. (2017). Modelling methane production kinetics of complex poultry slaughterhouse wastes using sigmoidal growth functions. *Renewable Energy*, 104, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.045>
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M. y Van't Riet, K. J. A. E. M. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and environmental microbiology*, 56(6), 1875-1881.
- Zhao, T., Chen, Y., Yu, Q., Shi, D., Chai, H., Li, L. y He, Q. (2019). Enhancement of performance and stability of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and kitchen waste by using bentonite. *PloS one*, 14(7), e0218856. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218856>