

Artículo de investigación

Volumen 4 Número 3 Julio 2017
 DOI: 10.19080/AIBM.2017.04.555640

Biotecnología y Microelectrónica

Copyright © Todos los derechos reservados por
 Jun Zhu

Desarrollo de modelos Gompertz generales y sus formas simplificadas de dos parámetros basados en la tasa de crecimiento microbiano específica para el crecimiento microbiano, los bioproductos y el consumo de sustrato



Jiacheng Shen y Jun Zhu*

Ingeniería Biológica y Agrícola, Universidad de Arkansas, EE.UU.

Presentación: 08 de junio de 2017; **Publicado:** 25 de julio de 2017

***Autor correspondiente:** Jun Zhu, Biological and Agricultural Engineering, University of Arkansas, USA, Tel479-575-2883;
 Email: junzhu@uark.edu

Abstract

El modelo Gompertz modificado se ha utilizado ampliamente para simular la cinética del crecimiento microbiano y la formación de bioproductos. Sin embargo, el problema fundamental de este modelo reside en su incapacidad para cumplir la condición inicial de los bioproductos. En este estudio se desarrolló un modelo general de Gompertz para el crecimiento microbiano y su forma de 2 parámetros, los cuales pueden reducirse al modelo original de Gompertz. El modelo desarrollado para el crecimiento microbiano se amplió además para tener en cuenta la producción de bioproductos y el consumo de sustrato mediante los correspondientes coeficientes de rendimiento. Todos los modelos desarrollados aquí pudieron cumplir las condiciones iniciales de crecimiento microbiano, bioproductos y consumo de sustrato. Para verificar el modelo se realizaron experimentos por lotes de codigestiones anaerobias de cama de ave y paja de trigo con un nivel de sólidos totales del 2%, consistentes en 100, 75 y 50% de VS de cama de ave. Los volúmenes específicos máximos de metano fueron de 207, 134 y 5,18 mL (g VS)⁻¹ para la codigestión de 50, 75 y 100% VS, respectivamente. El modelo desarrollado para los bioproductos se aplicó con éxito a los volúmenes acumulados de metano producidos por la codigestión anaeróbica. Los parámetros del modelo obtenidos a partir del modelo de bioproductos, combinados con los correspondientes coeficientes de rendimiento, se aplicaron a los modelos microbiano y de sustrato para predecir los cambios microbianos y de sustrato durante la codigestión, siendo los errores relativos inferiores al 2,21% para el primero y al 4,46% para el segundo, respectivamente.

Key words: Procesos anaeróbicos; Biogás; Biocinética; Modelo Gompertz; Lecho de aves; Tratamiento de residuos

Introducción

En la digestión anaeróbica, el volumen de gas acumulado y el volumen específico (volumen de gas por gramo de volátil

sólido (VS) o la demanda química de oxígeno (DQO)) se utilizan comúnmente para estimar la eficiencia del proceso, y sus perfiles con respecto al tiempo se describen a menudo mediante los modelos de primer orden (Ecuación (1) y (2)) [1,2] y el modelo Gompertz modificado (Ecuación (3)) [3-10].

$$P = P_m (1 - \exp(-kt)) \quad (1)$$

$$P = P_m (1 - \exp(-\beta t)) \quad (2)$$

donde P es el volumen acumulado de gas (mL); P_m es el volumen máximo de gas (mL); k es la constante de velocidad de reacción de primer orden, (d⁻¹); t es el tiempo de reacción, (d); y β es la fracción no degradable del sustrato (adimensional).

$$P = P_m \exp\left(\frac{g_m e}{\lambda}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{P_m}{P_m + 1} t\right)\right) \quad (3)$$

Donde g_m es la tasa máxima de producción de bioproductos (es decir, la tasa de producción en el punto de desviación de la curva P VS. t) (mL d⁻¹), λ es el tiempo de retardo, que se define como la intercepción en el eje t de la tangente que pasa por el punto de inflexión (d), y e es la base del logaritmo natural (adimensional).

En comparación con el modelo de primer orden, el modelo Gompertz modificado se utilizó comúnmente, ya que se correlacionó con dos parámetros de reacción bioquímica, g_m y λ. Sin embargo, el cortocircuito inherente de ambos modelos Gompertz y Gompertz modificado es evidente porque ninguno de ellos cumple la condición inicial (es decir, P = 0 en t = 0) cuando se utilizan para describir la producción de biogás (Ecuación (4)) a menos que el parámetro λ se acerque a infinito.

$$P = P_m \frac{e^{\xi \pi} g m e^{-1}}{0} \quad (4)$$

Este problema se debe a que tanto el modelo de Gompertz (Gompertz, 1825) como el modelo de Gompertz modificado [11] se desarrollaron para describir el crecimiento biológico y bacteriano en lugar de su producción de productos, como el metano, porque ambas situaciones tienen condiciones iniciales diferentes. Por ejemplo, en la producción de metano a partir de aguas residuales, la masa microbiana inicial no es cero debido a la adición de las semillas de lodo activado anaeróbico al biorreactor (Ecuación (4)) $\neq 0$ en $t = 0$), mientras que el volumen del producto (metano) es cero. Por lo tanto, el uso directo de los modelos Gompertz y Gompertz modificado sin corrección para simular la producción de bioproductos y el crecimiento microbiano no es apropiado.

Otro problema del modelo Gompertz modificado para la producción de bioproductos es que el tiempo de retardo ajustado a partir de los datos experimentales a veces es negativo, lo que ocurre en situaciones en las que los bioproductos se generan casi inmediatamente sin un periodo de retardo. Por ejemplo, el biogás se produce rápidamente durante la digestión anaeróbica de aguas residuales inoculadas con lodos anaeróbicos aclimatados. Por lo tanto, es necesario desarrollar dos modelos generales, así como su simplificación

formas de 2 parámetros ($\lambda = 0$), para el crecimiento microbiano y la producción de bioproductos. Otra ventaja del modelo de 2 parámetros es la reducción del número de combinaciones constantes ajustadas

en comparación con un modelo de 3 parámetros, y es bien sabido que las regresiones no lineales suelen producir muchas combinaciones de las constantes ajustadas [12].

Cuanto menor sea el número de constantes de ajuste requeridas, menor será el número de combinaciones de constantes de ajuste producidas. La cinética de un proceso biológico suele describirse completamente mediante tres variables, es decir, el consumo de sustrato, el crecimiento microbiano y la formación de producto. Mu et al. [7] simulaban la cinética del hidrógeno, de la sacarosa y de los microorganismos utilizando el modelo Gompertz modificado basado en tres conjuntos de datos cinéticos

recogidos, y se obtuvieron tres conjuntos de parámetros del modelo. Un trabajo similar fue también reportado, excepto para la simulación del microorganismo, por Wu et al. [9]. Sin embargo, el muestreo y el análisis del biogás en la digestión anaeróbica por lotes suele ser más fácil que la medición de la biomasa microbiana en la fase líquida, debido a la posible alteración de la condición anaeróbica mantenida en el líquido. Por lo tanto, estimar la masa microbiana basándose en el volumen de biogás producido se convierte en un reto. Afortunadamente, los coeficientes de rendimiento del bioproducto están

B. Ampliar los modelos desarrollados para los bioproductos al crecimiento microbiano y al consumo de sustrato con los coeficientes de rendimiento correspondientes.

C. Medir el volumen de metano específico acumulado de la codigestión de la cama de aves y la paja de trigo en un reactor discontinuo.

D. Aplicar los modelos desarrollados para simular el volumen de metano acumulado con respecto al tiempo, y obtener los parámetros del modelo.

E. Predecir la cinética del crecimiento microbiano (representado por la relación entre el sólido suspendido volátil (VS S) y el sólido suspendido no volátil (NON-VS S)) y el consumo de sustrato (representado por la relación entre el sólido volátil (VS) a sólido no volátil (NON-VS)) en la codigestión utilizando los parámetros del modelo obtenidos de la cinética de los bioproductos.

Desarrollo de modelos Gompertz generales y sus formas simplificadas de dos parámetros basadas en una tasa de crecimiento microbiano específica definida

Un modelo general de Gompertz y su forma simplificada de 2 parámetros para el crecimiento microbiano

La tasa de crecimiento microbiano específico adopta una forma exponencial [13]:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_c e^{\xi \pi} \beta c t X d t \quad (5)$$

donde μ es la tasa específica de crecimiento microbiano (d^{-1}), X es la masa microbiana (g), y b (d) y c (adimensional) son constantes.

Integrando la ecuación (5) con respecto al tiempo se obtiene

$$\ln X \exp b c t C_1 \quad (6)$$

donde C_1 es una constante. Cuando $t = 0$ y $X = X_0$, tenemos

$$C_1 \ln X_0 \exp \beta \quad (7)$$

y

$$X X_0 \exp \beta e^{\xi \pi} \beta c t X_0 \exp \beta b 1 e^{\xi \pi} \chi t \quad (8)$$

correlacionados con las tres variables, lo que permite utilizar una variable cinética combinada con el coeficiente de rendimiento correspondiente para describir otra variable cinética.

Los objetivos de este estudio eran

A. Desarrollar los modelos generales de Gompertz y sus formas simplificadas de 2 parámetros para el crecimiento microbiano basado en una tasa de crecimiento microbiano específica definida μ .

La ecuación (8) se reduce al modelo Gompertz (denominado modelo 3PG, ecuación (9)) si la constante 1 es mucho menor que $\exp(-ct)$.

$$X/X_0 = \exp\left(-\frac{\mu_{\max}}{X_0} \exp(-ct)\right) \quad (9)$$

Por lo tanto, la ecuación (8) puede denominarse modelo general de Gompertz de 3 parámetros para el crecimiento microbiano (G3PGB). Cuando $b=1$, el modelo 3PG se reduce al modelo Gompertz de 2 parámetros (denominado modelo 2PG, que es la ecuación (10)):

$$X/X_0 = \exp\left(-\frac{\mu_{\max}}{X_0} \exp(-ct)\right) \quad (10)$$

Cuando t se acerca a infinito, X se acerca al valor máximo X_m :

$$X_m/X_0 = \exp\left(-\frac{\mu_{\max}}{X_0}\right) \quad (11)$$

Cuando $t = 0$, la tasa específica de crecimiento microbiano se convierte en el valor máximo μ_m :

$$\mu_m c \exp \beta \dots \dots \dots (12)$$

Sustituyendo la ecuación (12) en la ecuación (8) se obtiene la segunda forma de G3PGB que contiene la tasa de crecimiento específico máxima que se muestra en la ecuación (13):

$$\mu_m c \exp \beta \dots \dots \dots (13)$$

$$\mu_m c \exp \beta \dots \dots \dots$$

Las derivadas primera y segunda de la ecuación (8) son

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m c \exp \beta \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = \mu_m c \exp \beta \dots \dots \dots (15)$$

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = 0$$

Si la segunda derivada es cero en el punto de inflexión, la el tiempo t_i en el punto de inflexión es

$$t_i = \frac{b}{c} \dots \dots \dots (16)$$

considerando

Las coordenadas en el punto de inflexión y la intercepción en el eje x de la tangente a través del punto de inflexión son $(b/c, cX_0 \exp(-\exp(b)))$, y $(\lambda, 0)$ (Figura 1). Así, la tasa máxima de crecimiento microbiano, μ_m (g d-1) es

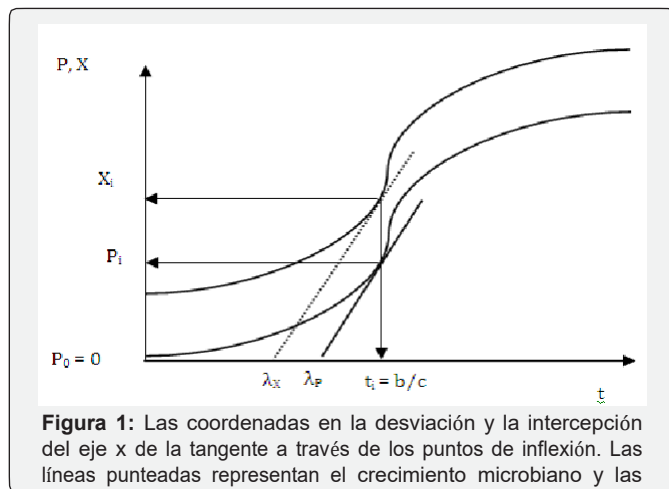


Figura 1: Las coordenadas en la desviación y la intercepción del eje x de la tangente a través de los puntos de inflexión. Las líneas punteadas representan el crecimiento microbiano y las líneas sólidas los bioproductos.

$$\mu_m = \frac{dX}{dt} \bigg|_{t=t_i} = \dots \dots \dots (17)$$

A partir de la ecuación (17), podemos derivar el tiempo de retardo:

$$\lambda = \dots \dots \dots (18)$$

Sustituyendo la ecuación (18) en la ecuación (8) se obtiene la tercera forma de G3PGB que contiene dos parámetros λ y μ_m (Ecuación (19)):

$$X = X_0 \exp \left(\frac{\mu_m b}{b_1} \tau \right) \dots \dots \dots (19)$$

Modelo de Gompertz para el crecimiento microbiano (G2PGB) descrito por la ecuación (21):

$$X = X_0 \exp \left(1 - \exp \left(-\frac{\mu_m}{X_0} \tau \right) \right) \dots \dots \dots (21)$$

Modelos generales de Gompertz de 3 parámetros y 2 parámetros para la formación de bioproductos y el consumo de sustratos:

Los coeficientes de rendimiento de las bacterias al sustrato $Y_{X/S}$ (g g-1), y del producto al sustrato $Y_{P/X}$ (mL g-1) se definen como [13]:

$$Y_{X/S} = \frac{dX}{dS} \dots \dots \dots (22)$$

$$Y_{P/X} = \frac{dP}{dX} \dots \dots \dots (23)$$

Combinando las ecuaciones (22) y (23) se obtiene el rendimiento

coeficientes del producto a las bacterias $Y_{P/X}$ (mL g-1):

$$Y_{P/X} = \frac{dP}{dX} \dots \dots \dots (24)$$

Integrando la ecuación (24) con respecto al tiempo,

la condición inicial: $t = 0, P_0 = 0$, y suponiendo que $Y_{P/X}$ es constante durante la digestión como lo reportan Fan et al. [14] produce:

$$P = Y_{P/X} X - P_0 \dots \dots \dots (25)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (25) se obtiene:

$$P = P_0 \exp \left(\frac{\mu_m}{X_0} \tau \right) \dots \dots \dots (26)$$

$$\text{Donde } P_0 = Y_{P/X} X_0 \dots \dots \dots (27)$$

La ecuación (26) puede definirse como el modelo general de Gompertz de 3 parámetros para bioproductos (G3PGB). Cuando t se acerca a infinito, P se aproxima al valor máximo P_m :

$$P_m = P_0 \exp \left(\frac{\mu_m}{X_0} \tau \right) \dots \dots \dots (28)$$

Sustituyendo la ecuación (12) en la ecuación (28) se obtiene la segunda forma de G3PGB que contiene el parámetro μ_m mostrado en Ecuación (29):

$$P = P_0 \exp \left(\frac{\mu_m}{X_0} \tau \right) \dots \dots \dots (29)$$

La primera y la segunda derivada de la ecuación (26) son similares a las de las ecuaciones (14) y (15), salvo que X se sustituye por P . Así, $t = b/c$ al punto de inflexión $t = t_i$ puede ser obtenido.

Sin embargo, dado que las coordenadas del punto de inflexión para la bio

son diferentes de los del crecimiento microbiano, que son $(b/c, P_0 \exp(-\exp(b)-1)-P_0)$ (Figura 1), el máximo bioproducto la tasa de producción, μ_m (mL d-1), se convierte en

$$\mu_m = \frac{dP}{dt} \bigg|_{t=t_i} = \dots \dots \dots (30)$$

De la ecuación (30) se desprende el tiempo de retardo de los bioproductos

producción:

Avances en biotecnología y microbiología

donde b , μ_m y λ son las constantes ajustadas. Si el tiempo de retardo se toma como cero, a partir de la ecuación (18), obtendremos:

$$b \cdot 1 \dots \dots \dots (20)$$

Por lo tanto, la ecuación (8) se reduce a una ecuación general de 2 parámetros

$$\frac{1}{b \cdot 1 \cdot \exp \left(-\frac{1}{c} \right) \cdot \exp \left(-\frac{1}{\beta} \right)} \dots \dots \dots (31)$$

Si el tiempo de retardo se fija en cero, la constante, b , basada en la ecuación (31) será:

$$b \cdot 0.973968 \dots \dots \dots (32)$$

$$P P \exp \exp 0.973968 \mid \varepsilon \zeta \pi \chi \tau \mid P \varepsilon \zeta \pi 2.64843 \mid \varepsilon \zeta \pi \chi \tau \mid \dots$$
$$S \Sigma^{-1} S^{\text{exp}} \beta \varepsilon \xi \pi \beta_{ct} 1 \dots\dots\dots (34)$$

Mientras tanto, los modelos de crecimiento microbiano

$$_{XX}^{P_X P_0} \varepsilon \xi \pi \beta \varepsilon \xi \pi \beta_{ct} 1 \dots\dots\dots (36)$$

Las ecuaciones (34) a (37) sugieren que los cambios de

$$= 2 \times \frac{SSR}{n} \quad (22)$$

Donde P_i es el valor del i ésimo punto calculado a partir de los

$$= 1 - m \quad (4.12)$$

Materiales

References

Cómo citar este artículo: Jiacheng S, Jun Z. Desarrollo de modelos

Tabla 1: Propiedades físicas de la cama de aves y de la paja de trigo.

Cuadro 2. Composición de la paja de trigo.

VS de PI*(%)	100	75	50
--------------	-----	----	----

* PL y WS: cama de aves de corral y paja de trigo

La paja se realizó en matraces de vidrio graduados de 1000mL.

Kansas y cosechado en junio de 2011. La paja de trigo se mantuvo

7. *Formulas (1.3), (1.4) and (1.5) are identical*

Había válvulas entre los matraces y las bolsas de gas para evitar que el aire entrara en los matraces durante la sustitución de las bolsas de gas para mantener el ambiente anaeróbico en los digestores. Antes de los experimentos, se prepararon los lodos activados anaeróbicos como inóculo durante 25 días, utilizando lecho de aves de corral al 2%, con la adición de lodos activados medio secos (con un contenido de humedad del 85%) tomados de la planta municipal de tratamiento de aguas residuales de Fayetteville y almacenados en el refrigerador. Luego, la cama de aves y la paja de trigo (Tabla 3) se mezclaron con 100mL de lodo activado anaeróbico preparado y agua del grifo para formar suspensiones sólidas totales al 2% (en base seca, volumen total de 500mL) en frascos de 1000mL. Se examinaron tres mezclas de cama de aves (100, 75 y 50% de VS en el total de VS) y paja de trigo (0, 25 y 50% de VS en el total de VS) en codigestión.

Las masas de las tres mezclas necesarias para cumplir esos porcentajes de VS se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$mdp_{\lambda} = \frac{mt}{s} \cdot \frac{rf}{\pi \lambda f w_{\sigma}} \quad (43)$$

$$m_{dws} = \frac{m_{ts}}{m_{dpl}} \quad (44)$$

donde r es la relación entre las fracciones de VS de la cama de aves de corral y la paja de trigo; mts es la masa total requerida de la cama de aves de corral y la paja de trigo crudas combinadas, (g); mpl y mws son las masas crudas de la cama de aves de corral y la paja de trigo requeridas en una relación de VS de la cama de aves de corral y la paja de trigo (g); $mdpl$ y $mdws$ son las masas secas de la cama de ave y la paja de trigo (g); fpl y fws son las fracciones de VS de la cama de ave y la paja de trigo; y $mcpl$ y $mcws$ son los contenidos de humedad de la cama de ave y la paja de trigo basados en las masas brutas (sin dimensiones). Se tomaron muestras de las suspensiones en los matraces para medir sus propiedades iniciales antes de purgar los matraces con nitrógeno puro durante 5 minutos para eliminar el aire del espacio de cabeza. A continuación, los matraces que contenían las suspensiones se mantuvieron a 37 °C en una incubadora (Fisher Scientific Isotemp Standard Incubators 600 Series), y se agitaron manualmente dos veces al día durante unos 30 segundos. Se tomaron muestras de biogás a diario durante los dos primeros días y, posteriormente, cada tres días hasta que no se produjera biogás en los matraces. Las muestras de líquido se tomaron al final de los experimentos. Las muestras líquidas iniciales y finales se dividieron en dos partes: una parte se midió directamente para las propiedades de las suspensiones que contenían sólidos, como VS, TS, y DQO total, etc., y otra parte se filtró a través de un papel de fibra de vidrio (marca FisherG4) en vacío, y el filtrado se utilizó para medir las propiedades solubles, como VS S, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total Kjeldahl (TKN), DQO soluble y ácidos grasos volátiles, etc. Los sólidos en suspensión que quedaron en el papel de filtro se utilizaron para medir el VS y el VS S después de calentarlos a 105 °C y 550 °C. También se llevaron a cabo digestiones controladas (100mL de purines activos más 400mL de agua del grifo sin ningún tipo de cama de ave ni paja de trigo) para eliminar el efecto de los purines activados sobre el volumen de gas producido en los experimentos no controlados.

Los sólidos totales y los sólidos volátiles se midieron por el método de la gravedad. La DQO total y soluble, el nitrógeno total, el nitrógeno total Kjeldahl (TKN) y el nitrógeno amoniacal se analizaron con un espectrofotómetro Hach DR 3900 y un reactor Hach DRB 200 siguiendo el manual de Hach y los métodos estándar [1]. La composición del biogás recogida en las bolsas de gas se analizó utilizando un cromatógrafo de gases Shimadzu (GC 2014) equipado con un detector de conductividad térmica (TCD) y una columna de Shin Carbon (Restek, longitud 2m× ID 2mm). La temperatura de la columna se mantuvo a 40 °C durante 2

minutos, 15% de dióxido de carbono y 70% de nitrógeno; 60% de metano y 40% de dióxido de carbono; 100% de metano) comprados a The Gas Co. (BuyCalGas.com).

Los ácidos grasos volátiles en la solución digerida también fueron

analizado por el mismo GC equipado con una ionización de llama (FID), un autoinyector (Shimadzu, AOC-20i), y una columna Stabilwax®-DA (Restek, longitud 30m× ID 0,53mm). La página web

minutos, y a continuación se incrementó a un ritmo de 25 °C por minuto hasta alcanzar los 150 °C, y luego se mantuvo durante 1 minuto. Las temperaturas del inyector y del TCD fueron de 180 °C y 185

°C, respectivamente. Se inyectó un volumen de muestra de 0,2mL utilizando una jeringa hermética al gas de forma manual. El GC se calibró para el metano, el dióxido de carbono y el nitrógeno utilizando tres gases estándar (15%

La temperatura de la columna se mantuvo a 40 °C durante 2 minutos, y luego se aumentó a razón de 25 °C por minuto hasta 150

°C, y se mantuvo durante 1 minuto. Las temperaturas del inyector y del FID fueron de 250 °C. El volumen de muestra inyectado fue de 0,006mL. La identificación de los ácidos grasos volátiles, incluyendo el ácido acético, el ácido propiónico, el ácido isobutírico, el ácido butírico, el ácido isovalérico, el ácido n-valérico, el ácido isocaproico, el ácido n-caproico y el ácido heptanoico, se verificó comparando sus tiempos de retención con los de una mezcla estándar (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO). Los volúmenes de biogás producidos por los digestores se midieron utilizando un medidor de gas húmedo (Modelo XMF-1, Shanghai Cixi Instrument Co., Ltd).

Resultados y discusión

Volúmenes específicos acumulados de metano de la codigestión de la cama de aves de corral y la paja de trigo

La figura 2 muestra los volúmenes específicos acumulados de metano (mL (g de VS inicial)⁻¹) en tres porcentajes de VS (100, 75 y 50% de VS de la cama de aves) durante la codigestión anaerobia. En general, todos ellos aumentaron con el tiempo de digestión. Al cabo de 35 días, los volúmenes máximos de metano específico para el 75 y el 50% de VS se alcanzaron sin más aumentos, pero el del 100% de VS siguió aumentando ligeramente (aunque el volumen global fue mucho menor que el de los otros dos). Los volúmenes máximos acumulados de metano específico de las VS del 50 y del 75% fueron de unos 207 y 134mL (g de VS inicial)⁻¹, respectivamente (Figura 2), pero la VS del 100% sólo tuvo menos de 5,2mL (g de VS inicial)⁻¹ (Figura 2). Mientras tanto, las eliminaciones de VS fueron de aproximadamente 46,2, 54,4 y 53,3% para las VS de 100, 75 y 50%, respectivamente. Aunque las concentraciones de nitrógeno amoniacal y de ácidos grasos volátiles totales suelen considerarse como dos inhibidores de la digestión anaerobia [16,17], en el presente estudio, sus concentraciones en los efluentes digeridos del 100% de VS fueron menores que las de los otros dos porcentajes de VS (excepto que el nivel de nitrógeno amoniacal para el 100% de VS fue similar al del 75% de VS (288 VS 287mg L⁻¹), lo que sugiere que el nitrógeno amoniacal y los ácidos grasos volátiles totales no fueron las causas de la baja producción de metano en el tratamiento del 100% de VS. Otro factor que influye en la producción de metano en la digestión anaeróbica es la relación entre el carbono y el nitrógeno de la materia prima. Aunque la relación teórica es de 16:1 (peso: peso) normalmente para la conversión de glucosa en metano, la relación C: N real debe ser mayor que 16:1 porque algunos compuestos de carbono en la biomasa, como la lignina, no son biodegradables por las bacterias anaerobias. Por esta razón, la relación C: N de la materia prima sólida que se suele medir con un analizador elemental puede ser inexacta. Por lo tanto, un concepto de la relación C: N disponible, rC/Na, que se definió como

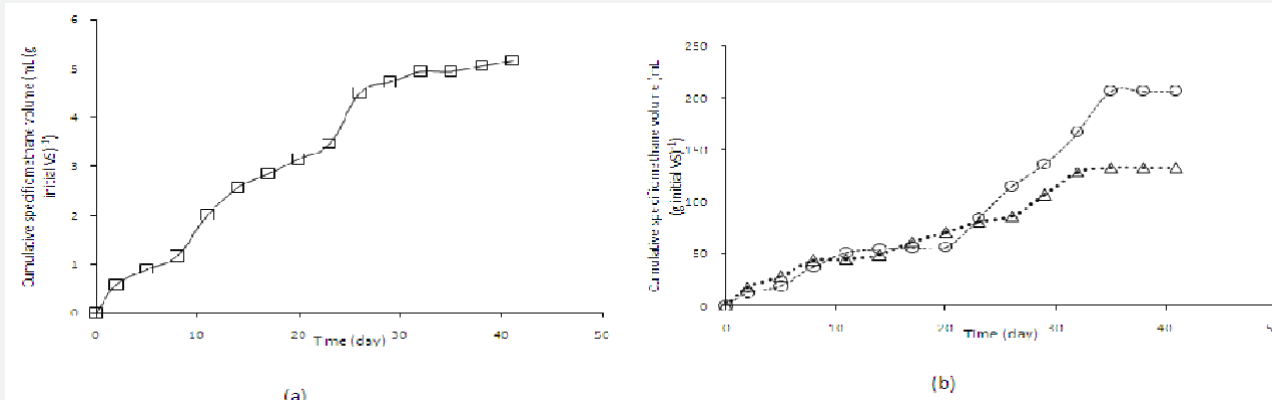


Figura 2: Volúmenes específicos acumulados de metano: (a):100%VS (□); (b): 75%VS (Δ) y 50%VS (○) de la cama de aves y de la paja de trigo con respecto al tiempo.

$$r_{C_{Na}} = \frac{12 \text{ COD}_{it} \text{ COD}_{ft} \text{ COD}_{fs}}{32 \text{ TN}_{fs}} \dots\dots\dots (45)$$

Tabla 4: Propiedades de los purines digeridos con un 2% de TS de lecho de aves de corral y paja de trigo.

VS de PL(%)	100	75	50
pH inicial	8.54	8.32	8.31
pH final	7.71	7.59	7.39
DQO total inicial (mg L-1)	13750	21450	29625
DQO total final (mg L-1)	9550	11645	7960
DQO soluble inicial (mg L-1)	2773	2540	2304
DQO soluble final (mg L-1)	2248	2213	2455
DQO disponible (mg L-1)	6448	12018	24120
C disponible (mg L-1)	2418	4507	9045
N total (mg L-1)	251	342	406
Relación entre el C y el N disponible	9.63	13.2	22.3
NH final ₃ (mg L-1)	288	287	435
Ácidos totales finales (mg L-1)	26	49	163
VSS/NON-VSS inicial	0.2379	0.1652	0.1376
VSS/NON-VSS final	0.4390	0.3597	0.2684
VS/NON-VS inicial	2.807	3.826	3.966
Final VS/NON-VS	1.555	1.828	1.935
YP/X (mL)	178.2	5224	12986
YP/S (mL)	28.63	508.5	836.3

* TP: fosfato total

Donde DQO_{it}, DQO_{ft} y DQO_{fs} son la DQO total inicial, la DQO total final y la DQO soluble final (todas en unidad: mg L⁻¹), respectivamente, TN_{fs} es el nitrógeno soluble final, y 12 y 32 son los pesos moleculares del carbono y del nitrógeno para la conversión de la unidad de DQO (unidad de O₂: mg L⁻¹) en unidad de carbono (C: mg L⁻¹). Los TN_{fs} en el efluente digerido se midieron en 251, 342 y 406mg-N L⁻¹ para los tres porcentajes de VS (Tabla 4), respectivamente. Por lo tanto, los ratios de C:N disponible, r_{C/N}, se calcularon en 9,63,

del efluente fueron de 7,71, 7,59 y 7,39 para los tres porcentajes de VS. El pH más alto (7,71) para el 100% de VS estaba más allá del rango de pH operativo normal de , que es de 6,4 a 7,5 (Kugelman y Chin, 1971), lo que

podría ser la segunda razón del menor volumen de metano de la VS al 100%. La DQO total inicial (29.625 mg L⁻¹) (Tabla 4) de la VS al 50% fue 2,16 (13.750 mg L⁻¹ para la VS al 100%) y 1,38 (21.450 mg L⁻¹ para la VS al 75%) veces superior a la de los otros porcentajes de VS, pero la VS correspondiente (8,2 g) de la VS al 50% fue sólo 1.16 (7,09g) y 1,08 (7,60g) veces los de los otros dos porcentajes de VS, lo que implica que los componentes químicos, como la hemicelulosa y la celulosa, de la paja de trigo contribuyeron más a la DQO que los de la cama de aves. Sin embargo, la DQO soluble inicial (2.773 mg L⁻¹) de la VS al 100% fue superior a las de los otros porcentajes de VS (2.540 mg L⁻¹ para la VS al 75% y 2.304 mg L⁻¹ de la VS al 50%), lo que podría atribuirse a las proteínas y aminoácidos fácilmente solubles de la cama de aves de corral en contraposición a los componentes de la paja de trigo.

Simulación de la cinética de producción de metano mediante los modelos desarrollados

Los volúmenes acumulados (mL) con respecto al tiempo se aplicaron a los modelos de G3PGP (ecuación (26)), G2PGP (ecuación (33)), 3PG (ecuación (9)) y 2PG (ecuación (10)). Los parámetros del modelo se obtuvieron mediante un programa de regresión no lineal de MATLAB. Los parámetros ajustados y los datos del análisis estadístico se enumeran en la Tabla 5 y 6, respectivamente, y las curvas simuladas se muestran en la Figura 3. Se puede observar que las curvas de regresión de los volúmenes acumulados de metano de los modelos G3PGP y G2PGP pasaron por el origen de las coordenadas como se esperaba, mientras que se observaron mayores desviaciones en el origen para las curvas de regresión calculadas a partir de los modelos 3PG y 2PG. Sin embargo, el modelo 3PG produjo el mejor efecto simulado entre los cuatro modelos, basándose en sus menores sumas de residuos cuadrados (SSR), sus mayores coeficientes de correlación (^R₂) (por ejemplo, para el 100% de VS, ^R₂ = 0,9875 en comparación con 0,9873 para G3PGP, 0,9857 para G2PGP y 0,9858 para 2PG) y los valores de la prueba F

el origen de coordenadas para G3PGP y G2PGP que los modelos 3PG y 2PG basados en el mismo número de parámetros ajustables. Se reconoce que el nivel de precisión para el punto de origen es mayor que para los otros puntos observados si la precisión de la

se consideran los datos obtenidos. Por lo tanto, si se aplica la regresión de mínimos cuadrados ponderados [18] (ecuación (46)), se obtienen una serie de parámetros estadísticos ponderados que se presentan en el cuadro 6.

Tabla 5: Los parámetros del modelo de G3PGP, 3PG, G2PGP y 2PG.

100% de VS de PL en el total de VS				
Parámetro	G3PGP	3PG	G2PGP	2PG
Pm (mL)	42.49	40.32	40.06	41.36
P0(mL)	7.451	1.957	3.050	2.729
b (d)	0.6432	1.107	0.974	1.000
c (-)	0.07112	0.08894	0.08854	0.08047
$\mu m(d-1)$	0.1353	0.2691	0.2345	0.2188
λ (d)	0.6851	1.203	0.000	0.000
75% de VS de PL en el total de VS				
Pm (mL)	1508	1503	1293	1503
P0(mL)	536.8	98.44	98.45	99.18
b (d)	0.2907	1.003	0.9740	1.000
c (-)	0.04030	0.05126	0.06486	0.05114
$\mu m(d-1)$	0.05389	0.1397	0.1718	0.1390
λ (d)	0.1079	0.05154	0.000	0.000
50% de VS de PL en el total de VS				
Pm (mL)	5587	4163	5761	2599
P0 (mL)	184.9	69.23	438.7	171.5
b (d)	1.236	1.410	0.9740	1.000
C (-)	0.02912	0.03949	0.02296	0.04205
$\mu m(d-1)$	0.1002	0.1618	0.06082	0.1143
λ (d)	11.09	10.39	0.000	0.000

Cuadro 6: Los valores estadísticos de las regresiones no lineales.

100% de VS de PL en el total de VS				
Parámetro	G3PGP	3PG	G2PGP	2PG
SSR	29.22	28.75	32.89	32.55
SSRw		44.07		41.36
R2	0.9873	0.9875	0.9857	0.9858
Ruanda2		0.9808		0.9729
F	1281	1848	1848	1868
Fw		847.8		972.0
75% de VS de PL en el total de VS				
SSR	53471	43440	71526	43445
SSRw		82203		82788
R2	0.9672	0.9734	0.9562	0.9734
Ruanda2		0.9496		0.9493
F	481.0	593.0	582.7	963.5
FW		311.5		502.5
50% de VS de PL en el total				

Avances en biotecnología y microbiología				
SSR	170158	153945	206212	465621
SSRw		173115		583281

R ²	0.9670	0.9702	0.9600	0.9098
Ruanda ²		0.9664		0.8870
F	328.1	363.0	438.8	190.7
Fw		322.4		150.9

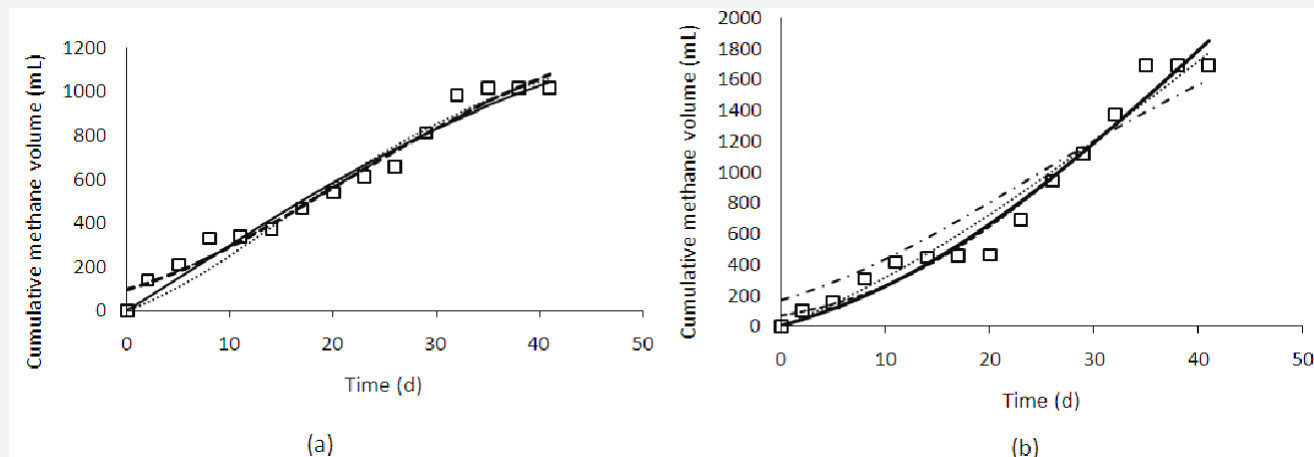


Figura 3: Volumen de metano acumulado con respecto al tiempo. Símbolos: puntos experimentales (\square); Líneas: simulación: Sólido: G3PGP; Punto: G2PGP; Raya: 3PG; Punto-raya: 2PG. (a) Lecho avícola 100%VS; (b) Lecho avícola 75%VS; (c) Lecho avícola 50% VS.

$$\min_w \sum_{i=1}^n w_i P_i^2 \quad (46)$$

donde w_i es el peso en el punto i . Por ejemplo, se ha dado un peso 3 a la desviación del punto de origen y un peso 1 a las desviaciones de otros puntos observados producidos

por los modelos. Los coeficientes de correlación ponderados (R_{2w}^2) producidos a partir de los modelos 3PG y 2PG fueron inferiores a los

correspondientes a los modelos G3PGP y G2PGP (por ejemplo, para el 100% de VS para 3PG, $R_{2w}^2 = 0,9808$, que era inferior a 0,9873 para G3PGP, y $R_{2w}^2 = 0,9727$ para 2PG, que era inferior a 0,9857 para G2PGP).

Predicción de la cinética del crecimiento de VS S y del consumo de VS utilizando las constantes cinéticas obtenidas del metano producción

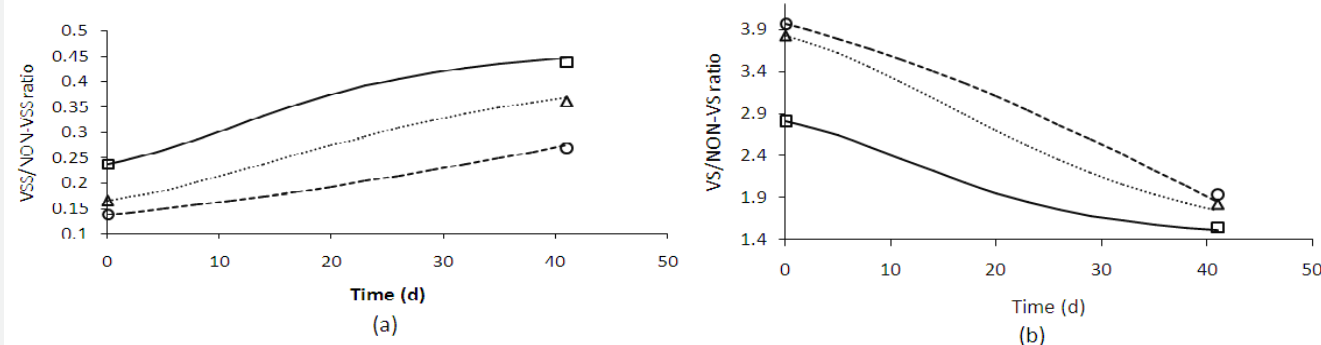


Figura 4: Las proporciones de VSS a NON-VSS (a) y de VS a NON-VS (b) con respecto al tiempo; símbolos: puntos experimentales (100% VS (\square), 75% VS (Δ) y 50% VS (\circ)); líneas: simulación: Sólido: 100% VS; Punto: 75% VS; Raya: 50% VS.

Los sólidos volátiles en suspensión y los sólidos volátiles se utilizan a menudo para medir la actividad microbiana en los lodos activados y las eficiencias de eliminación de componentes orgánicos en el tratamiento de aguas residuales, respectivamente [19]. Los ratios iniciales y finales de VS S a NON- VS S de los tres porcentajes de VS fueron 0,2379 y 0,4390 para el 100% de VS, 0,1652 y 0,3597 para el 75% de VS, y 0,1376 y 0,2684 para el 50% de VS, respectivamente. Según las definiciones de $Y_{P/X}$ (ecuación (24)), los $Y_{P/X}$ obtenidos para los tres porcentajes de

VS fueron 178,2, 5.223 y 12.986mL. Las constantes, P_0 y c , en G2PGB

(Ecuación (37)) (para simplificar, se ~~determinaron a partir de la regresión del metano (G2PGP~~ Ecuación (33)) (Tabla 5). Por lo tanto, la cinética del crecimiento microbiano basada en las proporciones de VS S a NON- VS S durante la digestión puede predecirse utilizando G 2 P G B Figura 4. Los coeficientes predichos de VS S a NON- VS S para los tres porcentajes de VS al final de los experimentos fueron 0,4462, 0,3676 y 0,2737 (errores relativos: 1,65%, 2,21% y 1,99%), respectivamente. Del mismo modo, los coeficientes de rendimiento, YP/S, de producto a sustrato de los tres porcentajes de VS fueron de 28,63, 508,5 y

836,3 mL (g VS)⁻¹, y las relaciones previstas entre VS y NO VS al final de los experimentos fueron de 1,510, 1,747 y 1,852 (relativas

2,90%, 4,46% y 4,28%) utilizando el modelo G2PGS (ecuación (35)) (Figura 4).

Predicciones de la tasa de producción de metano y de los rendimientos integral y diferencial de metano

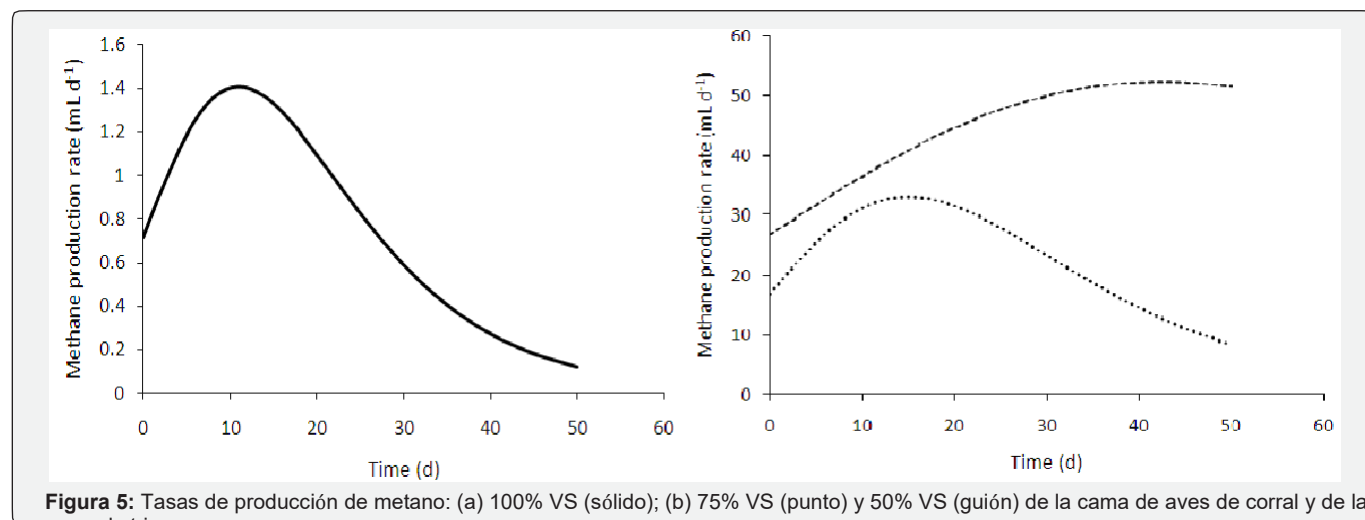


Figura 5: Tasas de producción de metano: (a) 100% VS (sólido); (b) 75% VS (punto) y 50% VS (guión) de la cama de aves de corral y de la cama de trigo.

Las tasas de producción de metano en los tres porcentajes de cama de aves y paja de trigo pueden expresarse como la primera derivada del modelo G2PGP (Ecuación (33)) y las curvas se muestran en la Figura 5:

$$\frac{dP}{dt} = cP \exp 0,973948 \exp 0,973948 ct \exp 0,973948 ct$$

$$\dots (47)$$

Es interesante observar que la tasa máxima de producción de metano (alrededor de 33,2 mL d⁻¹) se alcanzó el 15º día

por la VS del 75% en comparación con otras tasas máximas (1,40 mL d⁻¹ el 11º día por la VS del 100% y 52,4 mL d⁻¹ el 42º día por la VS del 50%), aunque el volumen máximo de metano (1.700 mL) de la VS del 50% fue mayor que el de la VS del 75% (1.016 mL). Esto puede sugerir que en el funcionamiento continuo de la digestión anaeróbica, el 75% de VS con un tiempo de residencia más corto podría producir más volumen total de metano que el 50% de VS con una residencia más larga tiempo.

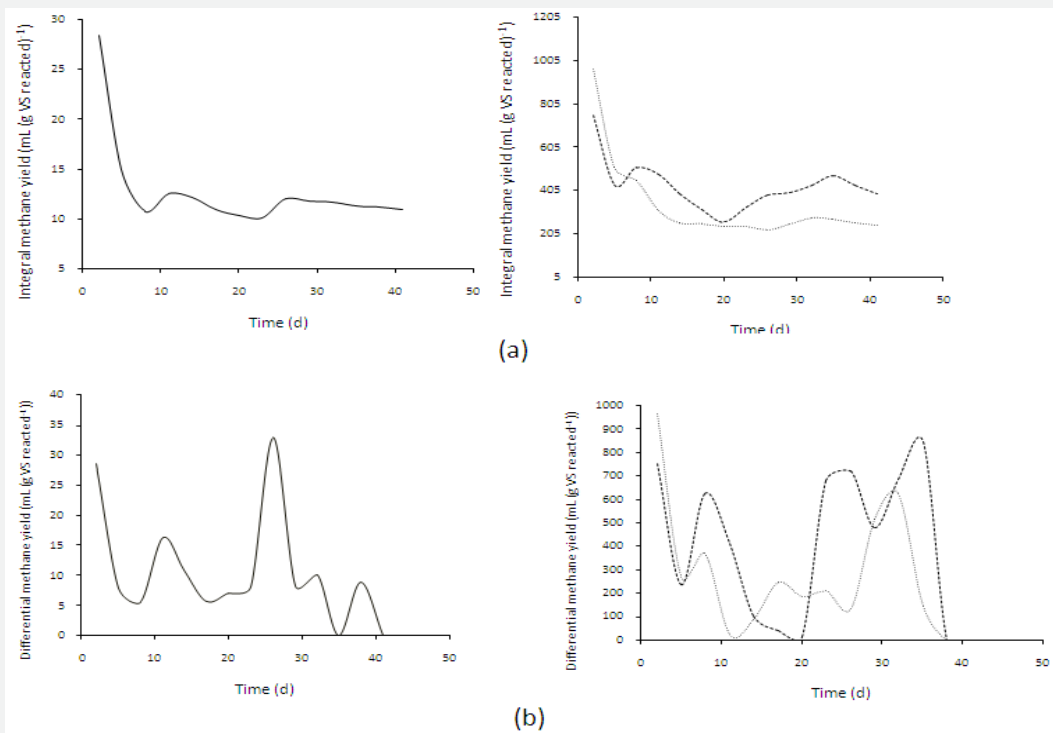


Figura 6: Rendimiento integral (a) y diferencial (b) de metano al 100% de VS (sólido), al 75% de VS (punto) y al 50% de VS (guión) de la cama de aves de corral y del trigo camada.

Por otro lado, el efecto de las materias primas en la digestión anaeróbica se suele expresar como el volumen de metano dividido por la VS añadida inicialmente. Sin embargo, las materias primas utilizadas en la digestión anaeróbica suelen ser mezclas formadas por varios componentes en lugar de sustancias puras, y estos componentes producen diferentes volúmenes de metano por sus respectivas masas. Por lo tanto, es conveniente definir el rendimiento de metano como el volumen de metano producido por la masa de VS consumida, en lugar de la VS añadida (esta última se denomina volumen específico de metano en el presente estudio). Esta información sobre el rendimiento será fundamental para comprender la contribución de los distintos componentes de la VS a la producción de metano. El rendimiento^m puede definirse además como rendimiento integral y rendimiento diferencial, y el primero se expresa como

$$\Psi_{P/SI} = \frac{P}{S_i - S_o} \dots\dots\dots (48)$$

y el último como

$$Y = \frac{\Delta P}{\Delta S} \dots\dots\dots (49)$$

La figura 6 muestra los rendimientos integrales y diferenciales de metano de los tres porcentajes de VS ensayados en este estudio, en los que se utilizaron los volúmenes de metano observados y las masas de sustrato calculadas a partir de la G2PGS (ecuación (35)). Los rendimientos integrales de metano demostraron los mayores valores de 28,5, 963 y 751mL (g de VS reaccionado)⁻¹ para 100, 75 y 50% de VS, respectivamente, al inicio. Hubo dos picos y valles para el rendimiento integral para el 100 y el 50% de VS, pero sólo un pico y un valle para el 75% de VS. Los rendimientos diferenciales para 100, 75 y 50% VS mostraron los valores máximos de 32,9, 686 y 846mL (g VS reaccionado)⁻¹ en los tiempos de residencia de 26, 32 y 35 días, respectivamente. Los tiempos de permanencia más largos necesarios para el 75 y el 50% de VS para alcanzar los rendimientos máximos se debieron, aparentemente, al aumento del contenido lingo-celulósico en los sustratos, que requirió tiempos más largos para la hidrólisis que para las proteínas y los aminoácidos contenidos en la cama de aves.

Conclusión

La codigestión anaeróbica de la cama de aves de corral y la paja de trigo a un nivel de sólidos totales del 2%, consistente en 100, 75 y 50% de VS (cama de aves de corral/(cama de aves de corral+paja de trigo)) en experimentos por lotes produjo los volúmenes de metano acumulado y específico de 35,8mL y 5,18mL (g VS)⁻¹, 1,1016mL y 134mL (g VS)⁻¹, y 1,699mL y 207mL (g VS)⁻¹, respectivamente. La baja relación C: N y el alto valor del pH dieron como resultado un bajo volumen de metano para el 100% de VS de la cama de aves. El V Sin de la materia prima se eliminó en aproximadamente 46,2, 54,4 y 53,3% para 100, 75 y 50% de VS, respectivamente. Se desarrollaron los modelos generales de Gompertz y sus formas simplificadas de 2 parámetros para el crecimiento microbiano, los bioproductos y el

Los errores de crecimiento microbiano y de consumo de sustrato son inferiores al 2,21% y al 4,46%, respectivamente.

Agradecimiento

Este trabajo cuenta con el apoyo financiero del USDA National Institute of Food and Agriculture, proyecto Hatch 1003122, y de la Arkansas Agricultural Experiment Station.

Referencias

1. Li Y, Feng L, Zhang R, He Y, Liu X, et al. (2013) Influence of Inoculum Source and Pre-incubation on Bio-Methane Potential of Chicken Manure and Corn Stover. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 171(1): 117-127.
2. Li Y, Zhang R, Chen C, Liu G, He Y, et al. (2013) Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet,

hemi-sólido, y condiciones de estado sólido. *Bioresource Technology* 149: 406-412.

3. Costa JC, Barbosa SG, Alves MM, Sousa DZ (2012) Termoquímica co-tratamientos biológicos y previos para mejorar la hidrólisis y el metano

consumo de sustrato, todos ellos capaces de cumplir las condiciones iniciales de la biocinética. Los modelos desarrollados se aplicaron con éxito para describir los volúmenes acumulados de metano producidos, el crecimiento microbiano y el consumo de sustrato durante la codigestión anaeróbica, con el relativo

4. Kafil GK, Kim SH, Sung KI (2013) Ensiling of fish industry waste for biogas production: Una evaluación a escala de laboratorio del potencial bioquímico de metano (BMP) y la cinética. *Bioresource Technology* 127: 326-336.
5. Lay JY, Li YY, Noike T (1998) Developments of bacterial population and methanogenic activity in a laboratory-scale landfill bioreactor. *Water Research* 32(12): 3673-3679.
6. Li Y, Zhang R, Liu X, Chen C, Xiao X, et al. (2013) Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Co-digestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure. *Energy & Fuels* 27(4): 2085-2091.
7. Mu Y, Yu HQ, Wang G (2007) A kinetic approach to anaerobic hydrogen- producing process. *Water Research* 41(5): 1152-1160.
8. Van Ginkel S, Sung SW, Lay JJ (2001) Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration. *Environmental Science & Technology* 35(24): 4726-4730.
9. Wu X, Zhu J, Miller C (2013) Estudio cinético de la producción de hidrógeno fermentativo a partir de estiércol porcino líquido suplementado con glucosa bajo pH controlado. *Journal of Environmental Science and Health Part B-Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes* 48(6): 477-485.
10. Zhu J, Zheng Y, Xu F, Li Y (2014) Co-digestión anaeróbica en estado sólido de residuos de procesamiento de heno y soja para la producción de biogás. *Bioresource Technology* 154: 240-247.
11. Zwietering MH, Jongenburger I, Rombouts FM, Vantriet K (1990) Modeling of the bacterial-growth curve. *Applied and Environmental Microbiology* 56(6): 1875-1881.
12. Zedlewski J, Sobti S, Garg N, Zheng F, Krishnamurthy A, et al. (2003) Modeling Hard-Disk Power Consumption. *FAST* pp. 217-230.
13. Blanch HW, Clark DS (1996) *Biochemical Engineering*. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, Estados Unidos.
14. Fan Y, Wang Y, Qian PY, Gu JD (2004) Optimización de la biodegradación por lotes del ácido ftálico y uso del modelo de Richards modificado para modelar la degradación. *International Biodeterioration & Biodegradation* 53(1): 57-63.
15. Rajan K, Carrier DJ (2014) Effect of dilute acid pretreatment conditions and washing on the production of inhibitors and on recovery of sugars during wheat straw enzymatic hydrolysis. *Biomass and Bioenergy* 62: 222-227.

16. Singh K, Lee K, Worley J, Risse LM, Das KC (2010) Anaerobic digestion of poultry litter: a review. *Applied Engineering in Agriculture* 26(4): 677-688.
17. Stafford DA, Hawkes DL, Horton R (1980) Methane production from waste organic matter. CRC Press Inc Boca Raton, Florida, USA.
18. Nist S (2012) Engineering Statistics Handbook. FreeComputerBooks.com.
19. Tchobanoglous G, Burton FL (1991) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. Irwin McGraw-Hill Boston MA, USA.



Esta obra está autorizada bajo la licencia
Creative Commons Attribution 4.0 Licens
DOI: [10.19080/AIBM.2017.04.555640](https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.04.555640)

Su próximo envío con Juniper Publishers le hará llegar los siguientes activos

- Servicio editorial de calidad
- Revisión rápida por pares
- Disponibilidad de reimpresiones
- Servicio de E-prints
- Manuscrito Podcast para una cómoda comprensión
- Logro global para su investigación
- Accesibilidad de los manuscritos en diferentes formatos
(Pdf, E-pub, Texto completo, Audio)
- Un servicio de atención al cliente incesante

Siga la siguiente URL para la presentación en un solo
paso

<https://juniperpublishers.com/online-submission.php>