

# Propuesta de aprendizaje de un método sencillo para calcular la producción de biogás en sistemas de depuración natural a efluentes de alta carga orgánica

Tania P. García-Ramírez <sup>\*a</sup>, Carlos A. Mendieta-Pino<sup>a</sup>, Saulo Brito-Espino<sup>a</sup>, Federico León-Zerpa<sup>a</sup>,  
Melania L. Rodríguez-Pérez<sup>a</sup>, Davinia E. Moreno-Rodríguez<sup>a</sup> Alejandro Ramos-Martín<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Natural (iUNAT) Edificio Polivalente I, Parque Científico Tecnológico

## ABSTRACT

En este trabajo se ha desarrollado una propuesta de modelización y simulación numérica con un software libre de código abierto, Scilab. La propuesta para el aprendizaje consiste en la simulación de un biodigestor anaeróbico ante una carga continua y discontinua con un modelo matemático AM2 basado en dos reacciones, la acidogénesis-acetogénesis, considerando un crecimiento de tipo Monod, y la metanogénesis, con un crecimiento tipo Haldane. La digestión anaeróbica se ha convertido en un proceso satisfactorio para la estabilización de aguas residuales con alta carga orgánica. El objetivo de esta propuesta es ser utilizado en las actividades formativas prácticas a desarrollar por el estudiante en el contexto de alguna de las asignaturas de los Grados y Máster Universitario con competencias en el área de tecnología medioambiental. En las simulaciones, el modelo propuesto ha demostrado ser una herramienta efectiva para la simulación del proceso de digestión anaeróbica, ha demostrado ser un sistema eficiente para reducir la carga orgánica en aguas residuales y es versátil ya que permite modificar el diseño, de forma rápida, en función de las necesidades futuras por los estudiante o docente que se puede utilizar para comprender y aprender el objetivo propuesto.

**Palabras clave:** Métodos numéricos, digestión anaeróbica, modelo, Scilab

## 1. INTRODUCCIÓN

La digestión anaeróbica se ha convertido en un proceso satisfactorio para la estabilización de aguas residuales con alta carga orgánica, y es importante comprender los diversos factores que afectan el diseño del biorreactor. Asimismo, los sistemas de tratamiento anaeróbico son procesos naturales que tiene lugar en áreas donde no hay oxígeno libre disponible y son ideales para el tratamiento de residuos altamente biodegradables. La digestión anaeróbica se ha vuelto más popular en los últimos años, principalmente debido a su capacidad para generar energía a partir de los desechos <sup>1</sup>. Los avances en las metodologías de ecología microbiana en las últimas décadas han dado lugar a las herramientas para calificar y cuantificar sistemas impulsados microbially, permitiendo a los teóricos probar mejor las hipótesis, lo que resulta en el potencial de un mejor diseño de ingeniería y operación de procesos biológicos <sup>2</sup>.

El objetivo principal de este trabajo es una propuesta sencilla de modelización y simulación numérica con SCILAB, para el aprendizaje de la dinámica continua y discontinua de los digestores biológicos con un modelo matemático AM2 para el tratamiento de aguas residuales, debido al alto costo que se debe enfrentar al implementar una instalación de este tipo <sup>3-5</sup>. Por este motivo, se han desarrollado diversos modelos matemáticos para la simulación cuya utilidad dependerá del objetivo y complejidad del trabajo.

Para realizar la simulación se ha elegido el programa informático Scilab, es gratuito y de "código abierto". Este programa está orientado al cálculo numérico, especialmente a las aplicaciones científicas y de ingeniería... Puede ser utilizado como simple calculadora matricial, pero su interés principal radica en los cientos de funciones tanto de propósito general como especializadas que posee, así como en sus posibilidades para la visualización gráfica. Varios autores han elegido este programa debido a que se pueden encontrar muchos ejemplos de programas listos y probados <sup>6-10</sup>.

Por lo tanto, es de interés desarrollar estrategias de aprendizaje, basada en las TICs, las cuales ayuden a los estudiantes, de los grados y másteres del área con competencias en tecnologías del medio ambiente, a aprender y comprender la evolución de las variables relevantes en la operación de los biorreactores anaeróbicos, además siendo útil para la estimación del potencial de generación del biogás y su valoración como vector energético <sup>8,10</sup>. Este trabajo se desarrolla dentro de los Proyectos de Innovación Educativa para la Formación Interdisciplinaria (PIEFI) - Línea 3. Contenidos y programas de

formación y en el seno del Proyecto de Innovación Educativa “Laboratorios como entornos de trabajo para el aprendizaje activo y colaborativo mediante el diseño, desarrollo, construcción, utilización y el rediseño de equipos y dispositivos para su aplicación en las prácticas” (PIE 2022-60)” de la ULPGC.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia, también denominada producción de biogás, es un proceso microbiológico que ocurre de forma espontánea en la naturaleza en ausencia de oxígeno. Esta se descompone la materia orgánica en compuestos más sencillos, que son transformados en ácidos grasos volátiles, que son los principales intermediarios y moduladores del proceso para la obtención una mezcla de gases denominado biogás, este proceso se lleva a cabo por la acción de un grupo de microorganismos específicos que trabajan en secuencias<sup>11,12</sup>.

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo debido al alto número de reacciones bioquímicas que tienen lugar y por la cantidad de bacterias involucradas en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren simultáneamente<sup>4,12</sup>. La digestión se puede agrupar en tres principales etapas: hidrólisis, formación de ácidos y metanogénesis, las cuales serán explicadas en el apartado de fases de la digestión anaeróbica. Cuando mayor es el número de etapas que se consideran en el modelo matemático mayor es su complejidad, pero a la vez mejora la representatividad del proceso<sup>4,12</sup>.

Por ser un proceso complejo, el modelado de la digestión anaerobia mejora el entendimiento de este y permite formular o validar ciertas hipótesis que se tengan respecto al proceso en sí. Un modelo matemático permite predecir el comportamiento de este proceso complejo cuando es sometido a diferentes condiciones de sus variables manipulables como temperatura, concentración, composición y flujo de los sustratos de entrada, nivel de pH, oxigenación, etc y de esta manera se reduce las posibles complicaciones que se pueden obtener cuando el proceso se lleve a cabo<sup>1</sup>.

### 2.1 Modelo AM2

En cuanto a la modelización matemática del proceso de digestión anaeróbica el modelo AM2 propuesto por Bernard en 2001, está diseñado para utilizar como sustrato aguas residuales que posean materia orgánica soluble y basada en carbohidratos, por lo que la etapa de hidrólisis es irrelevante. En este modelo sólo considera dos reacciones limitantes, la acidogénesis del sustrato a partir del afluente ( $S_1$ ) y la metanogénesis de los ácidos grasos volátiles ( $S_2$ ), obtenidos como producto en la primera de las reacciones<sup>4,13</sup>. Está destinado a aplicaciones analíticas y de control o al desarrollo de instrumentación.

### 2.2 Componentes

En el modelo matemático AM2, se requiere al menos cuatro componentes para describir lo que ocurre en un digestor, el sustrato, componente que sirve de alimento a la biomasa,  $S_1$  y  $S_2$ , y la biomasa, que es el cultivo de microorganismos que se alimenta la materia orgánica biodegradable,  $X_1$  y  $X_2$ .

### 2.3 Procesos biológicos en el digestor

El modelo solo considera dos pasos limitantes, la acidogénesis y la metanogénesis.

Primera reacción: Acidogénesis del sustrato suministrado por el afluente.



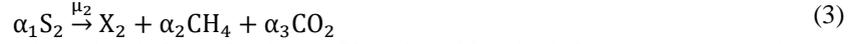
Dónde  $S_1$  es el sustrato orgánico del afluente,  $X_1$  es la población de bacterias acidogénicas y  $\alpha_i$  son los coeficientes estequiométricos de cada especie.

La cinética utilizada es el modelo de Monod.

$$\mu_1 = \mu_{\max 1} \cdot \frac{S_1}{K_s + S_1} \quad (2)$$

Dónde  $\mu_{\max 1}$  crecimiento máximo y  $K_s$  la constante Michaelis-Menten.

Segunda reacción: Metanogénesis de ácidos grasos volátiles.



Dónde  $S_2$  son los ácidos grasos volátiles obtenidos de la acidogénesis,  $X_2$  es la población de bacterias metanogénicas y  $\alpha_i$  son los coeficientes estequiométricos de cada especie.

La cinética utilizada es el modelo de Haldane.

$$\mu_2 = \mu_{\max 2} \cdot \frac{S_2}{K_s + S_2 + \frac{S_2^2}{K_i}} \quad (4)$$

Dónde  $\mu_{\max 2}$  la tasa máxima de crecimiento bacteriano sin tener en cuenta la inhibición,  $K_s$  la constante de Michaelis-Menten o coeficiente de saturación media y  $K_i$  es el coeficiente de inhibición debido al sustrato.

#### 2.4. Sistema de ecuaciones

El sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias relacionado con la dinámica de la biomasa, del sustrato queda como se muestra a continuación.

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = (\mu_1 - D - K_{d1})X_1 \quad (5)$$

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = D(S_{in1} - S_1) - \alpha_1 \mu_1 X_1 \quad (6)$$

$$\frac{dX_2(t)}{dt} = (\mu_2 - D - K_{d2})X_2 \quad (7)$$

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = D(S_{in2} - S_2) + \alpha_4 \mu_1 X_1 - \alpha_7 \mu_2 X_2 \quad (8)$$

#### 2.5 Régimen estacionario del modelo AM2

Se considera que un sistema alcanza el estado estacionario cuando las características del mismo no varían a lo largo del tiempo<sup>2,9,10</sup>. Sabiendo esto y teniendo en cuenta los procesos y las variables consideradas en el modelo, para obtener el estado del sistema en régimen estacionario para las biomazas y para los sustratos se establece que:

$$\begin{cases} (\mu_1 - D - K_{d1})X_{re1} = 0 \\ D(S_{in1} - S_{re1}) - \alpha_1 \mu_1 X_{re1} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Siendo las ecuaciones correspondientes a la digestión de los azúcares ( $S_1$ ),

$$\begin{cases} (\mu_2 - D - K_{d2})X_{re2} = 0 \\ D(S_{in2} - S_{re2}) + \alpha_4 \mu_1 X_1 - \alpha_7 \mu_2 X_2 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Y siendo las ecuaciones correspondientes para la metanogénesis del ácido acético ( $S_2$ ).

Suponiendo que las concentraciones de la biomasa son distintas de cero y partiendo de las ecuaciones anteriores, se considera que:

$$\begin{cases} (\mu_1 - D - K_{d_1}) = 0 \\ (\mu_2 - D - K_{d_2}) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Sustituyendo en cada una de las expresiones el valor correspondiente de su propia cinética (2), (4) se queda de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \mu_{\max 1} \cdot \frac{S_1}{K_{s_1} + S_1} - D - K_{d_1} = 0 \\ \mu_{\max 2} \cdot \frac{S_2}{K_{s_2} + S_2 + \frac{S_2^2}{K_i}} - D - K_{d_2} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Despejando la concentración de sustrato de cada una de las ecuaciones, se obtienen los valores en régimen estacionario para cada uno de ellos.

Para los azúcares 
$$S_{re1} = \frac{(D + K_{d_1}) \cdot K_{s_1}}{\mu_{\max 1} - D - K_{d_1}} \quad (13)$$

Para los ácidos acéticos 
$$S_{re2} = \frac{-\left(1 - \frac{\mu_{\max 2}}{D + K_{d_2}}\right) K_i \pm \sqrt{\left(1 - \frac{\mu_{\max 2}}{D + K_{d_2}}\right)^2 K_i^2 - 4K_{s_2} K_i}}{2} \quad (14)$$

Despejando el valor de  $X_{re1}$  y  $X_{re2}$  en la segunda expresión (5) de las ecuaciones y sustituyendo los valores ya calculados, de cada uno de los sustratos, se obtienen sus respectivos valores en régimen estacionario para cada una de las biomazas.

Para los azúcares.

$$X_{re1} = \frac{D(S_{in1} - S_{re1})(S_{re1} + K_{s_1})}{\alpha_1 \mu_{\max 1} S_{re1}} \quad (15)$$

Para los ácidos acéticos.

$$X_{re2} = \left( D(S_{in2} - S_{re2}) + \alpha_4 \mu_{\max 1} \frac{S_{re1}}{K_{s_1} + S_{re1}} X_{re1} \right) \left( \frac{S_{re2} K_i + K_{s_2} K_i + S_{re2}^2}{\alpha_7 \mu_{\max 2} S_{re2} K_i} \right) \quad (16)$$

### 3. RÉGIMEN TRANSITORIO

Cuando se produce un cambio en las variables del sistema, decimos que el proceso está en régimen transitorio<sup>9,10,14</sup>. Al cambiar las condiciones de un elemento se pierde el régimen estacionario, y tras sucederse los cambios se vuelve de nuevo al equilibrio. Al intervalo entre los dos regímenes estacionario se le denomina régimen transitorio.

Como se ha explicado con anterioridad reactor según la carga se puede considerar de carga continua, donde la carga se introduce de forma constante, o discontinua, donde la carga se realiza por lotes, se introduce un caudal entrante  $\hat{Q}$ , que es equivalente al volumen de carga  $V_1$  entre el tiempo de carga  $T$ . En este apartado además de ver como es el sistema en estado transitorio se va a observar la diferencia entre una carga por lotes y continua<sup>10</sup>.

#### 3.1 Carga por lotes

Cuando se habla de carga por lotes la carga supone la introducción de un volumen determinado  $V_1$ , con una carga orgánica, en muy poco tiempo<sup>10</sup>. El volumen  $V_1$ , de la carga, cada vez que es introducido desplaza una cantidad de volumen igual a  $V_1$ , siendo el volumen total del digestor  $V_T$ , y volumen no desplazado es  $V_2$ , por lo que se tiene:

$$V_T = V_1 + V_2. \quad (17)$$

Una vez que se realiza la carga, el volumen de líquido con la materia orgánica se supone perfectamente mezclado, en el mismo instante de la carga. Como consecuencia de lo anterior, la dilución pasa a tener la siguiente expresión:

$$D = \frac{\hat{Q}}{V_1 + V_2} = \frac{V_1}{T} \quad (18)$$

Donde  $\hat{Q}$  es el caudal de entrada, T el tiempo de carga,  $V_1$  el volumen de carga,  $V_T$  el volumen total del digestor.

Para adaptar el modelo a la entrada por lotes se considera lo siguiente.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= (\mu - k_d)X \\ \frac{dS}{dt} &= -\alpha\mu X \end{aligned} \right\} \leftrightarrow t \neq nT \quad (19)$$

Cuando no se realiza la carga

$$\left. \begin{aligned} \Delta S &= \frac{V_1}{V_T} (S_{in} - S^*(nT)) \\ \Delta X &= \frac{V_1}{V_T} (X_{in} - X^*(nT)) \end{aligned} \right\} \leftrightarrow t = nT \quad (20)$$

Cuando se realiza la carga siendo  $S^*(nT)$  la concentración del sustrato justo antes de la carga. Quedando la concentración  $S(nT)$  tras la carga y el mezclado.

$$S(nT) = \frac{S_{in}V_1 + S^*(nT)V_2}{V_T} \quad (21)$$

Para todas las especies presentes consideradas en este trabajo fin de grado la mezcla queda de la siguiente manera:

$$S_1 = \frac{S_{in_1}V_1 + S_1^*V_2}{V_T} \quad (22)$$

$$X_1 = \frac{X_{in_1}V_1 + X_1^*V_2}{V_T} \quad (23)$$

$$S_2 = \frac{S_{in_2}V_1 + S_2^*V_2}{V_T} \quad (24)$$

$$X_2 = \frac{X_{in_2}V_1 + X_2^*V_2}{V_T} \quad (25)$$

### 3.2 Sistema de ecuaciones por lotes

El sistema de ecuaciones por lotes cuando se no se realiza la carga (26) y cuando se está realizando (27) con la dinámica de la biomasa y del sustrato queda como se muestra a continuación.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= (\mu_1 - K_{d1})X_1 \\ \frac{dS_1(t)}{dt} &= -\alpha_1\mu_1X_1 \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= (\mu_2 - K_{d2})X_2 \\ \frac{dS_2(t)}{dt} &= \alpha_4\mu_1X_1 - \alpha_7\mu_2X_2 \end{aligned} \right\} \leftrightarrow t \neq nT \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{V_1}{V_T} (X_{in1} - X_1^*(nT)) \\ S_1 &= \frac{V_1}{V_T} (S_{in1} - S_1^*(nT)) \\ X_2 &= \frac{V_1}{V_T} (X_{in2} - X_2^*(nT)) \\ S_2 &= \frac{V_1}{V_T} (S_{in2} - S_2^*(nT)) \end{aligned} \right\} \leftrightarrow t = nT \quad (27)$$

### 3.3 Método numérico para un sistema por lotes

Debido a que el sistema de ecuaciones muestra unas relaciones no lineales en las variables de estado, resulta necesario la aplicación de una aproximación numérica del problema para la resolución de este. Este último supone aplicar los procedimientos típicos de los problemas de valor inicial. En este trabajo se propone utilizar un método denominado predictor-corrector, que se fundamenta en la utilización de una solución explícita, como solución inicial predictora, y luego a partir de ésta, se utilizará una solución implícita iterativamente hasta lograr la convergencia de la solución, con una tolerancia<sup>8,10</sup>. Las soluciones utilizadas son: para el predictor la forma más simple de Euler, en su forma explícita, tal y como se muestra a continuación:

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0 \quad (28)$$

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n), \quad t_n = t_0 + nh \quad (29)$$

Y para el corrector la solución implícita de Crank-Nicolson, o también equivalente a una solución trapezoidal. Esta solución se muestra a continuación:

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0 \quad (30)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1})], \quad t_n = t_0 + nh \quad (31)$$

Unificando las dos soluciones en el proceso de predicción-corrección queda:

$$y_{n+1}^{(P)} = y_n + hf(t_n, y_n) \rightarrow \text{Predicción} \quad (32)$$

$$y_{n+1}^{(C_0)} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1}^{(P)})] \rightarrow \text{Arranque del método} \quad (33)$$

$$y_{n+1}^{(C_{k+1})} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_{n+1}, y_{n+1}^{(C_k)})] \rightarrow \text{Corrección, hasta que} \quad (34)$$

$$|y_{n+1}^{(C_{k-1})} - y_{n+1}^{(C_k)}| < \epsilon$$

Tal y como se indica este proceso iterativo seguirá hasta cumplir con las especificaciones de convergencia.

A modo de ejemplo se muestra como quedaría el sistema de ecuaciones propuesto para la biomasa degradadora de azúcares

Explícito

$$\frac{X_{1n} - X_{1n-1}}{\Delta t} = \left( \mu_{\max 1} \frac{S_{1n-1}}{K_{S_1} + S_{1n-1}} - K_{d_1} \right) \cdot X_{1n-1} \quad (35)$$

Implícito

$$\frac{X_{1n} - X_{1n-1}}{\Delta t} = \left( \mu_{\max 1} \frac{S_{1n}}{K_{S_1} + S_{1n}} - K_{d_1} \right) \cdot X_{1n} \quad (36)$$

Crank-Nicolson

$$\frac{X_{1n} - X_{1n-1}}{\Delta t} = \frac{\mu_{\max 1}}{2} \left[ \left( \frac{S_{1n-1} X_{1n-1}}{K_{S_1} + S_{1n-1}} - K_{d_1} \right) + \left( \frac{S_{1n} X_{1n}}{K_{S_1} + S_{1n}} - K_{d_1} \right) \right] \quad (37)$$

#### 4. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la simulación del comportamiento de  $X_1$  y  $X_2$  y sustratos, ante una carga continua y una discontinua en régimen transitorio, según el tiempo de simulación. Para esta simulación, se precisa variar el caudal de entrada y el tiempo entre carga y carga. Para ello, se ha considerado una carga continua y una carga discontinua donde  $V_1$  es 0.01 litros teniendo siempre un volumen total de 10 litros. Además, las condiciones de trabajo son iguales en ambas simulaciones donde la concentración de entrada de azúcares es de 20 y a una dilución de 30.

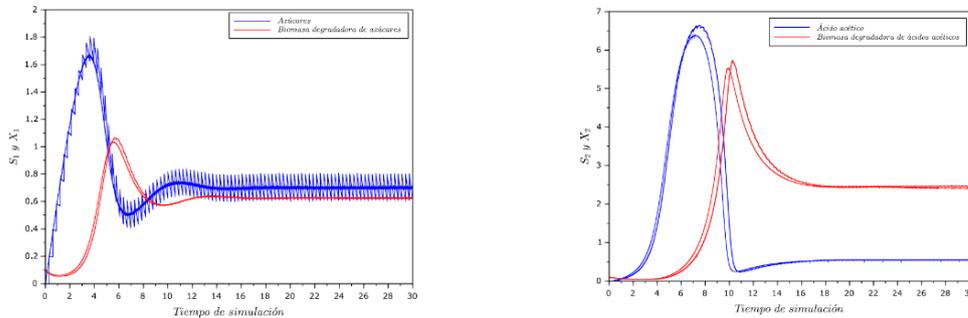


Figura1. Estado transitorio de azúcares a diferentes cargas y el estado transitorio de ácidos acéticos a diferentes cargas

En la figura 1 se muestra como la biomasa y las concentraciones de sustratos se ven afectadas por el tipo de carga, en cuando al sustrato se aprecia que los picos son producidos por la introducción de la carga y la disminución por el consumo de este en el reactor, produciendo una pequeña oscilación del número de bacterias degradadoras de azúcares. Este efecto también se aprecia en las bacterias degradadoras de ácido acético provocando un desplazamiento en la producción.

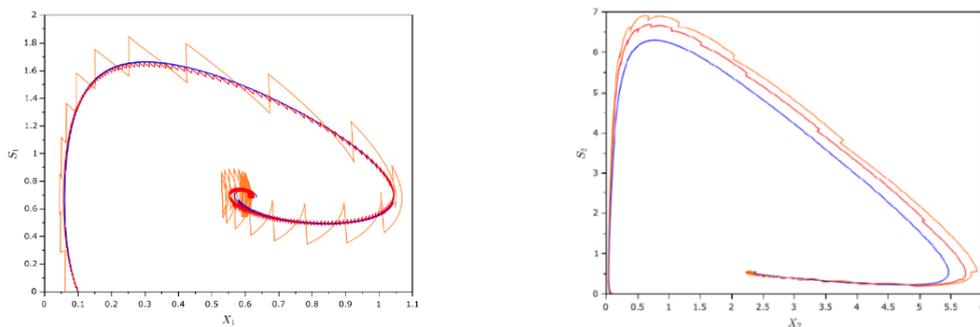


Figura 2. Plano fase de azúcares y de ácido acético en estado transitorio a diferentes cargas.

En las figuras 2 se muestra de la misma forma en el plano fase, pero a tres cargas distintas, la azul, la carga continua, la roja, la carga discontinua explicadas anteriormente y la naranja, de carga discontinua, donde  $V_1$  es 0.015 litros manteniendo las mismas condiciones. Al variar las cargas, de carga continua, a cargas por lotes, el proceso se ve afectado, pero lleva al mismo estado estacionario. No obstante, hay que tener en cuenta que para que no se produzca la merma de las bacterias, al aumentar el tiempo entre carga y carga, se tiene que aumentar el volumen de carga.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo el modelo propuesto ha demostrado ser una herramienta eficaz para la estimación del proceso de digestión anaerobia y para el aprendizaje de la dinámica continua y discontinua de los digestores anaeróbicos. Además, el programa de cálculo matemático SCILAB de código abierto, es una herramienta adecuada para llevar a cabo un proyecto de modelización matemática de este tipo, puesto que es una plataforma muy flexible que permite al usuario simular las condiciones dinámicas que ocurren durante el proceso de digestión anaerobia, siendo por otra parte, de fácil aplicación en actividades formativas para estudiantes de los Grados y Máster Universitario con competencias en el área de tecnología medioambiental.

**Financiación:** Este proyecto ha sido cofinanciado por la Cooperación Interreg V-A España-Portugal. Programa MAC (Madeira-Azores-Canarias) Proyecto MITIMAC MAC2/1.1a/263.

Este proyecto ha sido financiado en parte por los fondos europeos Next Generation EU (NGEU) bajo el “Real Decreto 641/2021, de 27 de julio, por el que se regula la concesión directa de subvenciones a universidades públicas españolas para la modernización y digitalización del sistema universitario español en el marco del plan de recuperación, transformación y resiliencia (UNIDIGITAL) - Proyectos de Innovación Educativa para la Formación Interdisciplinar (PIEFI) - Línea 3. Contenidos y programas de formación” en el seno del Proyecto de Innovación Educativa “Laboratorios como entornos de trabajo para el aprendizaje activo y colaborativo mediante el diseño, desarrollo, construcción, utilización y el rediseño de equipos y dispositivos para su aplicación en las prácticas” (PIE 2022-60)”.

## REFERENCIAS

- [1] Kythreotou, N., Florides, G. and Tassou, S. A., “A review of simple to scientific models for anaerobic digestion,” *Renew Energy* **71**, 701–714 (2014).
- [2] Wade, M. J., Harmand, J., Benyahia, B., Bouchez, T., Chaillou, S., Cloez, B., Godon, J.-J., Moussa Boudjemaa, B., Rapaport, A., Sari, T., Arditi, R. and Lobry, C., “Perspectives in mathematical modelling for microbial ecology,” *Ecol Modell* **321**, 64–74 (2016).
- [3] Batstone, D. J., “Mathematical Modelling of Anaerobic Reactors Treating Domestic Wastewater: Rational Criteria for Model Use,” *Rev Environ Sci Biotechnol* **5**(1), 57–71 (2006).
- [4] Gerardi, M. H., [The Microbiology of Anaerobic Digesters], John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA (2003).
- [5] Lauwers, J., Appels, L., Thompson, I. P., Degreève, J., van Impe, J. F. and Dewil, R., “Mathematical modelling of anaerobic digestion of biomass and waste: Power and limitations,” *Prog Energy Combust Sci* **39**(4), 383–402 (2013).
- [6] Fotsa, D., Houpa, E., Bekolle, D., Thron, C. and Ndoumbe, M., “Mathematical Modelling and Optimal Control of Anthracnose,” *BIOMATH* **3**(1) (2014).

- [7] BOGUTA, A., “Evaluation of the correctness of the SciLab program in a simulation of an electric vehicle run,” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY* **1**(8), 124–127 (2020).
- [8] Hernández-Melián, P., Brito-Espino, S., Mendieta-Pino, C., Báez, S. O. P. and Martín, A. R., “Propuesta de modelización y simulación numérica con SCILAB para el aprendizaje de la dinámica continua y discontinua de los digestores biológicos anaeróbicos” (2016).
- [9] Brito-Espino, S., Mendieta-Pino, C. A., Pérez-Báez, S. O. and Ramos-Martín, A., “Application of a model-based method for hydrodynamic processes in constructed wetland to management of livestock wastewater based on finite elements method,” *Desalination Water Treat* **152**, 92–98 (2019).
- [10] Leon, F. A., Ramos Martin, A., Brito Espino, S., Mendieta Pino, C. and Garcia-Ramirez, T., “Proposal for modelling and numerical simulation with SCILAB for learning the continuous and discontinuous dynamics of biological and anaerobic digesters,” *Desalination Water Treat* **234**, 15–21 (2021).
- [11] Gerardi, M. H., [The microbiology of anaerobic digesters], Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [12] Núñez-Pintado, L., “MODELAMIENTO Y CONTROL DE PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS Y/O AGUAS RESIDUALES” (2017).
- [13] Bernard, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A. and Steyer, J.-P., “Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process,” *Biotechnol Bioeng* **75**(4), 424–438 (2001).
- [14] Mendieta Pino, C. A., “Evaluación y modelización de sistemas de tratamiento no-convencional o natural para efluentes procedentes de explotaciones ganaderas de porcino en la isla de Gran Canaria” (2015).