

# Evaluación de la digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga en una y dos etapas en escala de laboratorio

**Evaluation of anaerobic digestion of low-concentration wastewater in one and two stages at laboratory scale**

Erick Javier Centeno-Mora<sup>1</sup>, María Mercedes Rodríguez-Salina<sup>2</sup>

Fecha de recepción: 16 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 3 de setiembre, 2024

Centeno-Mora, E; Rodríguez-Salina, M.M. Evaluación de la digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga en una y dos etapas en escala de laboratorio. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 25-37.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7080>

- 1 Escuela de Ingeniería Civil y Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible,  
Universidad de Costa Rica. Costa Rica  
 [erick.centenomora@ucr.ac.cr](mailto:erick.centenomora@ucr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-8806-0355>
- 2 Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Costa Rica  
 [maria.rodriguezsalina@ucr.ac.cr](mailto:maria.rodriguezsalina@ucr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0009-0001-5012-8112>

## Palabras clave

Digestión anaerobia; biogás; generación de energía; tratamiento de aguas residuales; sostenibilidad ambiental; biorreactores.

## Resumen

Este artículo aborda la creciente necesidad de métodos eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en Costa Rica, centrándose específicamente en la digestión anaeróbica en dos etapas de aguas residuales con baja concentración de materia orgánica, tanto para aguas residuales ordinarias como para efluentes sintéticos. Para ello se evaluó la digestión anaeróbica de agua residual poco concentrada en reactores anaeróbicos con medio de soporte, en escala de laboratorio. Se comparó el comportamiento de la digestión anaeróbica en una y dos etapas para agua residual ordinaria y sintética (glucosa), monitoreando diversos parámetros de los sistemas, incluida eficiencia de remoción de materia orgánica, pH, alcalinidad, potencial Redox y el potencial de producción de biogás. Los resultados revelaron que, para efluentes de rápida biodegradabilidad como la glucosa, la digestión anaeróbica de aguas residuales en dos etapas ofrece ventajas significativas, como mayor estabilidad del proceso y un incremento en la producción de biogás. Sin embargo, al tratar aguas residuales ordinarias, se encontraron desafíos que indican la necesidad de investigaciones adicionales para afinar el proceso. La digestión en dos etapas mostró ser menos conveniente para estas aguas debido a la estabilidad ya lograda en un solo reactor y la complejidad añadida de operar dos etapas. En conclusión, el estudio subraya el potencial de la digestión anaeróbica de dos etapas en el tratamiento de aguas residuales de baja concentración orgánica, particularmente para sustancias rápidamente biodegradables, y señala áreas para futura investigación y optimización del proceso.

## Keywords

Anaerobic digestion; Biogas; Energy generation; Wastewater treatment; Environmental sustainability; Bioreactors.

## Abstract

This article addresses the growing need for efficient and sustainable methods for wastewater treatment in Costa Rica, with a specific focus on two-stage anaerobic digestion of low-concentration wastewater, for both municipal wastewater and synthetic effluents. The anaerobic digestion of low-concentration wastewater was evaluated in anaerobic reactors with a support medium at a laboratory scale. The behavior of anaerobic digestion in one and two stages for municipal and synthetic (glucose) wastewater was compared, monitoring various system parameters, including organic matter removal efficiency, pH, alkalinity, Redox potential, and biogas production potential. The results revealed that for rapidly biodegradable effluents such as glucose, anaerobic digestion in two stages offers significant advantages, such as greater process stability and increased biogas production. However, challenges were encountered in treating ordinary wastewater, indicating the need for further research to refine the method. Two-stage digestion was found to be less convenient for these waters due to the stability already achieved in a single reactor and the added complexity of operating two stages. In conclusion, the study highlights the potential of two-stage anaerobic digestion in the treatment of low organic concentration wastewater, particularly for rapidly biodegradable substances, and points out areas for future research and process optimization.

## Introducción

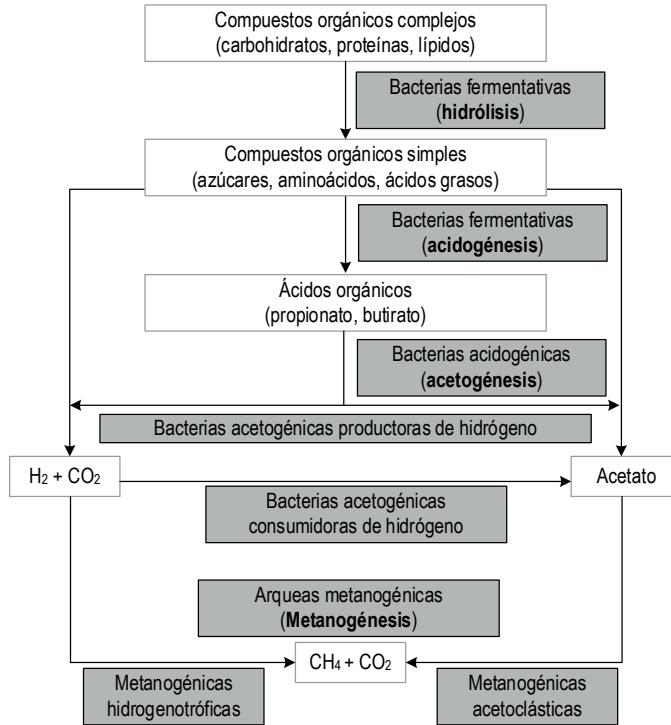
La gestión y el tratamiento de las aguas residuales es un desafío en muchos países desarrollados, como en el caso de Costa Rica. En este país, según investigaciones recientes [1], [2], [3], menos del 20% de las aguas residuales ordinarias (municipales) es colectado por medio de un alcantarillado sanitario y tratado en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Por este motivo, desde el 2015 el gobierno publicó un documento que llamó Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (PNSAR) [4], proponiendo un plan de acción para solucionar esta problemática al 2045. Según la PNSAR, al 2030 se captaría y trataría el 100% de las aguas residuales de las zonas densamente pobladas y, al 2045, el 100% de las zonas en las que no sea posible emplear soluciones de saneamiento individual. Esto equivaldría a cubrir más del 80% de la población con sistemas de alcantarillado sanitario y PTARs. El desafío es grande, y la búsqueda de soluciones tecnológicas sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales es clave para el cumplimiento de estas ambiciosas metas.

En este sentido, los procesos de tratamiento biológico por medio de reactores anaeróbicos han probado ser una opción muy atractiva para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias y las especiales para climas tropicales o calientes, como el de Costa Rica [5], [6], [7], [8]. Entre las ventajas de estos sistemas sobre las tecnologías aeróbicas como los lodos activados se encuentran [9], [10]: la menor generación de lodo, no requerimiento de aireación mecanizada para el proceso biológico, generación de biogás, el cual puede ser aprovechado energéticamente, simplicidad operacional y menores costos operativos en general.

Según se observa en la Figura 1, la digestión anaeróbica de la materia orgánica es un proceso complejo, compuesto por distintas etapas. De forma general, la literatura suele separar el proceso completo en cuatro fases [10]: hidrólisis, que consiste en la conversión de materia orgánica compleja (proteínas, carbohidratos, lípidos) en compuestos de cadena simple (aminas, azúcares, ácidos grasos); acidogénesis, para convertir los compuestos de cadena simple en ácidos orgánicos; acetogénesis, para convertir los ácidos orgánicos en hidrógeno y acetato; y la metanogénesis, que convierte el acetato e hidrógeno en metano, el cual es un gas energéticamente aprovechable. Distintos tipos de microorganismos se encargan de realizar el proceso completo en un complejo ecosistema microbiano que tiene las condiciones ambientales adecuadas en los reactores anaeróbicos.

Un tema que ha generado interés recientemente [11], [12] es el de separar el proceso en dos partes, dejando las primeras tres fases en un reactor (reactor hidrolítico o de acidificación), y la metanogénesis en un segundo reactor. Esto facilita la operación de cada reactor en condiciones ambientales más adecuadas para los distintos tipos de microorganismos involucrados en el proceso completo, siendo que las arqueas metanogénicas (encargadas de la fase metanogénica) suelen ser más sensibles a cambios en el entorno (pH, temperatura, presencia de compuestos tóxicos, entre otros) [10]. Algunas ventajas de este modo de operación reportadas en la literatura [11], [13], [14], [15] incluyen una mayor estabilidad del proceso, mayor generación de biogás y mayor eficiencia para la remoción de materia orgánica.



**Figura 1.** Etapas de la digestión anaeróbica

Adaptado de Chernicharo (2007) [10]

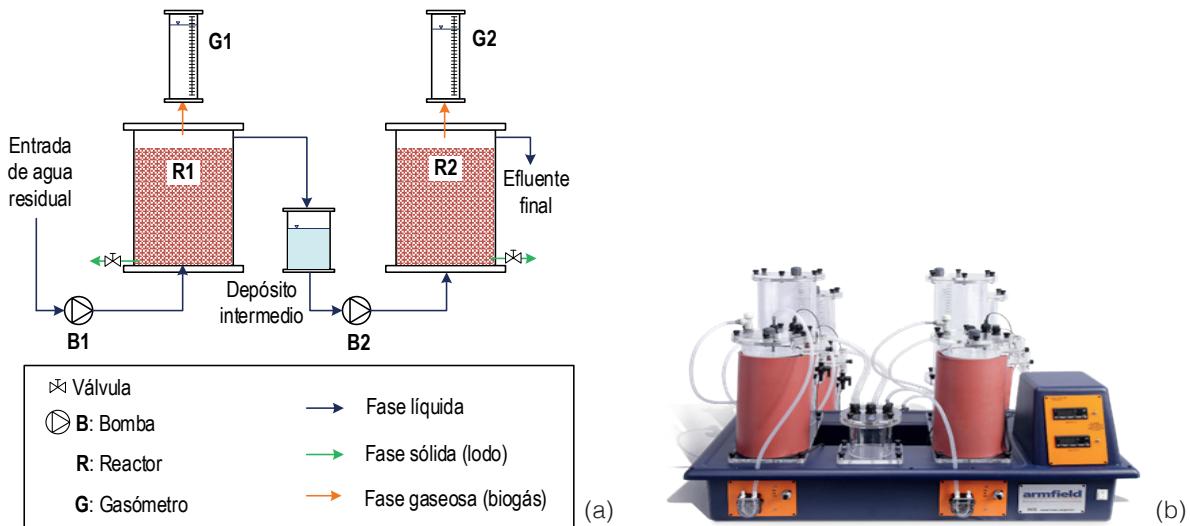
Esta opción ha sido explorada principalmente para sistemas de digestión anaeróbica de sólidos y para efluentes de alta concentración de materia orgánica, y han sido poco explorados a nivel experimental (en Costa Rica y en la literatura internacional) para sistemas con baja carga orgánica, como lo son los sistemas de aguas residuales ordinarias. Un estudio más detallado de esta opción podría señalar nuevas vías para la optimización de los procesos de digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga, con el fin de extender su aplicación en la región (y en zonas de clima caliente, en general), y promover una gestión más sostenible de las aguas residuales.

Desde esta perspectiva, este artículo tiene por objetivo evaluar experimentalmente la digestión anaeróbica en dos etapas de las aguas residuales de baja carga orgánica en escala de laboratorio, con el fin de analizar su factibilidad para el tratamiento de aguas residuales en Costa Rica.

## Materiales y métodos

### *Sistema experimental para digestión anaeróbica*

La fase experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Para las pruebas se consideró un reactor anaeróbico en dos etapas con medio de soporte en escala de laboratorio. La Figura 2 muestra el montaje experimental de los reactores anaeróbicos utilizados en este trabajo.



**Figura 2.** Reactor anaeróbico en dos etapas con medio de soporte: (a) Esquema de funcionamiento; (b) Fotografía del sistema [16]

Según se muestra en la Figura 1, el sistema experimental consistió en dos reactores anaeróbicos de 5L con medio de soporte (bio-esferas de plástico de 25mm de diámetro). Los sistemas fueron alimentados por medio de dos bombas peristálticas a caudal constante (una bomba por reactor), utilizando agua residual sintética y agua residual ordinaria. Se operaron en una etapa y en dos etapas, utilizando el depósito intermedio para la alimentación del reactor 2. El volumen de biogás fue medido por desplazamiento de volumen de agua, por medio de gasómetros del mismo equipo. Las muestras de lodo fueron tomadas por medio de válvulas de bola de cada reactor. Los reactores fueron operados a temperatura ambiente, la cual varió de aproximadamente 22 a 26°C durante todo el experimento.

#### Parámetros de control del experimento y métodos analíticos

Durante el experimento se realizaron análisis de pH, temperatura, alcalinidad, potencial Redox (ORP), DQO y sólidos suspendidos totales en el agua residual, tanto a la entrada como a la salida de los reactores anaeróbicos (Figura 1). También se realizaron análisis de sólidos totales y volátiles en el lodo. Se siguieron los procedimientos establecidos en el Standard Methods versión 2012 [17]. El caudal de agua residual fue medido volumétricamente, aforando las bombas peristálticas, y el volumen generado de biogás fue medido cada hora durante la puesta en marcha de los experimentos, por medio del gasómetro de las unidades. Debido a dificultades en el equipo, y para facilitar la comparación entre las etapas de la investigación, la producción de biogás se normalizó por medio de un índice de generación de biogás, siendo el valor de 1.0 el correspondiente a la mayor producción de biogás reportado en el experimento.

El Cuadro 1 muestra los análisis de laboratorio realizados y los métodos analíticos que fueron seguidos.

**Cuadro 1.** Análisis de laboratorio realizados durante el experimento

Parámetro	Unidades	Muestra	Frecuencia de medición	Método analítico
pH	-	Agua	Diaria	Sonda multiparámetro Hannah
Temperatura	°C	Agua	Diaria	Sonda multiparámetro Hannah
Potencial Redox	mV	Agua	Diaria	Sonda multiparámetro Hannah
Alcalinidad total	mgCaCO <sub>3</sub> /L	Agua	Diaria	HACH 8203 – titulación con ácido sulfúrico
Demandा Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	Agua	Dos veces por semana	APHA5220D
Humedad, sólidos totales y sólidos volátiles	%	Lodo	Inicio y final del experimento	APHA2540G

La Eficiencia de remoción de materia orgánica (DQO) fue calculada según se muestra en la Ecuación 1.

$$E = \frac{DQO_E - DQO_{F,S}}{DQO_E} \cdot 100\%$$

En donde,  $E$ : eficiencia de remoción de DQO;  $DQO_E$ : DQO total del agua residual a la entrada del sistema;  $DQO_{F,S}$ : DQO filtrada a la salida (filtro de 1.2 μm) del sistema. Se decidió considerar la DQO filtrada a la salida para no considerar el posible arrastre de sólidos del reactor (DQO soluble a la salida), reflejando la eficiencia real de remoción de la materia orgánica del sistema.

#### *Fases de la investigación*

La investigación constó de tres fases experimentales, según se detalla en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Fases experimentales de la investigación

Fase	Modo de operación de proceso de digestión anaeróbica	Tipo de agua residual / sustrato	TRH del reactor (h)	Número de repeticiones
1	Una única etapa	Sintética / glucosa	50	9
2	Una única etapa	Agua residual ordinaria	50	9
3	Dos etapas: $R_1$ : fase acidogénica y acetogénica $R_2$ : fase metanogénica	Sintética / glucosa	$R_1$ : 25 $R_2$ : 50	9

Es necesario mencionar que, durante la investigación, no fue posible forzar la digestión en dos etapas para el agua residual ordinaria, según se analiza en la sección de resultados. Según se observa en el Cuadro 2, para cada etapa se realizaron 9 repeticiones con el fin de obtener resultados representativos de las condiciones evaluadas. Estas repeticiones consistieron en ciclos de operación diarios en los cuales se monitoreó el sistema durante 7 horas continuas.

### *Agua residual de alimentación del sistema y lodo de inoculación*

El agua residual ordinaria (Fase 2 de la investigación) fue tomada de una planta de tratamiento de aguas residuales de un residencial (caudal promedio de 230 m<sup>3</sup>/d) con reactor anaeróbico. El agua se tomó después del tratamiento preliminar (tamizado de 4mm y desarenado) y antes de la alimentación en el reactor anaeróbico. En el caso del agua residual sintética (Fase 1 y Fase 2), se preparó una mezcla con glucosa para una concentración teórica de DQO de 600 mg/L (condiciones de baja carga, similares a las del agua residual ordinaria). Se agregó un volumen de aproximadamente 5-10 mL de agua residual ordinaria por litro de efluente sintético para proveer los macronutrientes necesarios para el proceso biológico.

Con respecto al lodo utilizado en los reactores anaeróbicos a escala de laboratorio, se consideró inocularlos con lodo de un reactor UASB que trataba aguas residuales ordinarias. El lodo fue previamente tamizado (1mm) para retirar los sólidos de mayor tamaño, según se observa en la Figura 3.



**Figura 3.** Tamizado del lodo anaeróbico antes de la inoculación de los reactores de laboratorio

Para cada reactor de 5 L se colocaron 700 mL de lodo anaeróbico con las características del Cuadro 3. Se completó el volumen con agua residual ordinaria hasta los 5L y se dejó el sistema sin alimentación durante 24 horas a temperatura ambiente antes de iniciar con la carga progresiva de los reactores. Posteriormente el sistema fue puesto en marcha a un caudal bajo de 0.81 L/d (TRH de 6.2 d) con agua residual sintética (glucosa) hasta lograr condiciones estables de operación. A partir de esta condición se ejecutaron las fases experimentales del trabajo.

En el Cuadro 3 se muestra las principales características fisicoquímicas del agua residual y el lodo utilizados en este estudio.

**Cuadro 3.** Características del agua residual y lodo anaeróbico de inoculación

Tipo	Origen	Características	Observaciones
Agua residual sintética	Agua destilada con glucosa y micronutrientes	DQO medida: 597 a 657 mg/L	Sin sólidos suspendidos.
Agua residual ordinaria	PTAR de aguas residuales ordinarias	DQO medida: 399 a 505 mg/L	Sólidos suspendidos típicos de aguas residuales ordinarias (200-250 mg/L)
Lodo de inoculación	Lodo de reactor UASB tamizado en PTAR de aguas residuales ordinarias	ST: 2.4 % SV: 1.6 % SV/ST: 0.65	Volumen por reactor de 700 mL

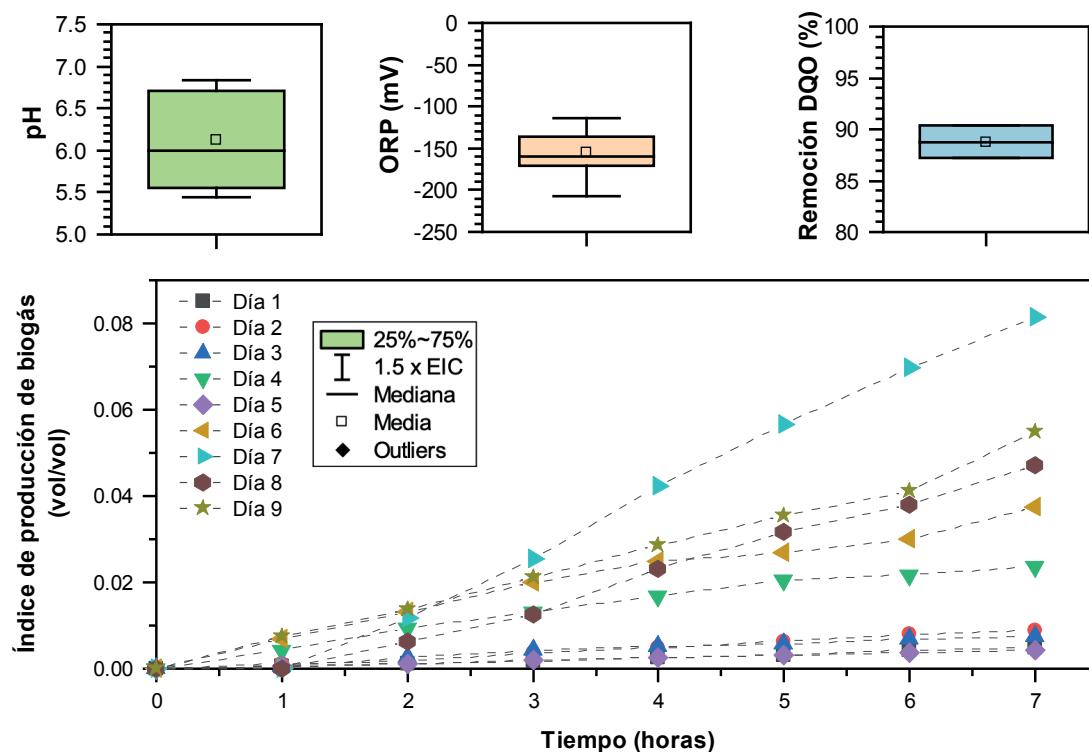
DQO: demanda química de oxígeno; SST: sólidos suspendidos totales; ST: sólidos totales; SV: sólidos volátiles.

Según se observa en el Cuadro 3, tanto el agua residual ordinaria como los lodos presentaron condiciones típicas según la literatura técnica [10], [18]. Vale la pena mencionar que la relación SV/ST del lodo al final del experimento fue muy similar a la inicial, con un valor de 0.69.

## Resultados y discusión

### *Digestión anaeróbica en una etapa*

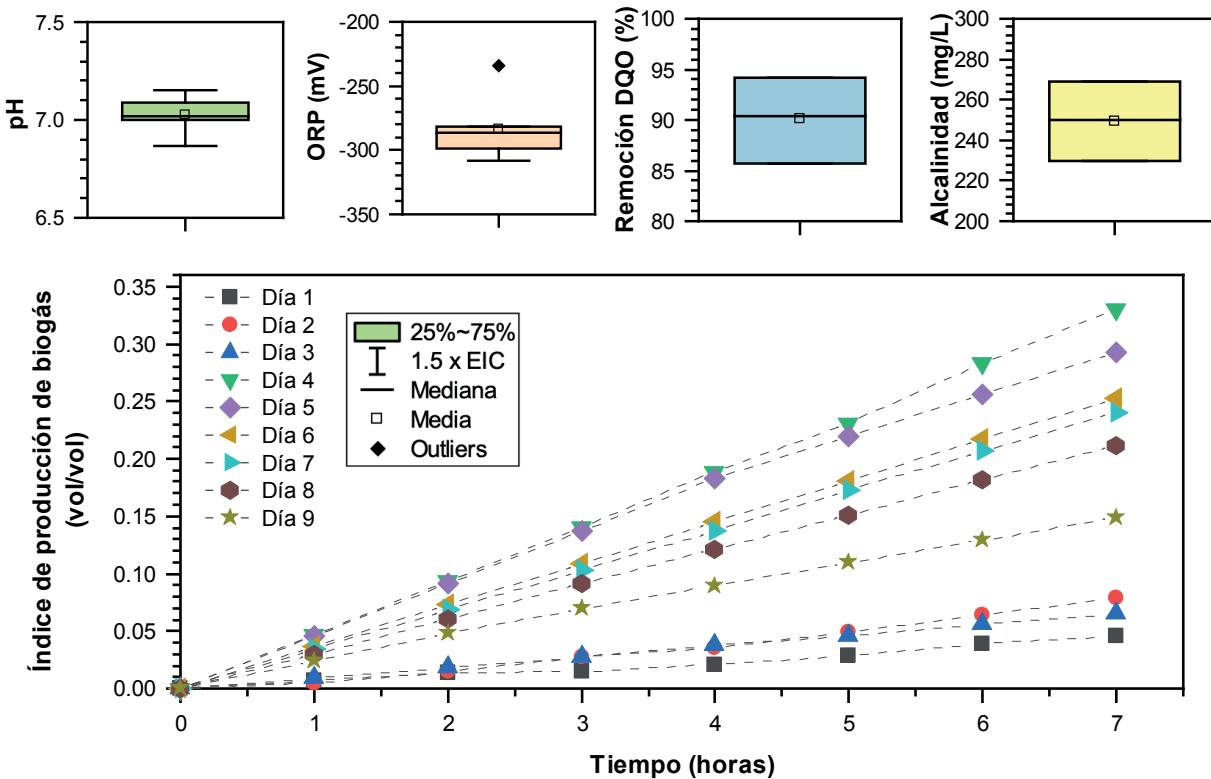
En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para el reactor anaeróbico en una etapa operando con sustrato artificial (glucosa).



**Figura 4.** Operación del reactor anaeróbico en una etapa para el sustrato artificial (glucosa)

Según se observa en la Figura 4, para esta fase se presentaron condiciones inestables en relación con la producción de biogás, generando muy poco en los primeros días. Esto se debió a que en los primeros días se tuvo una acidificación del reactor anaeróbico, evidenciada por caída del pH hasta aproximadamente 5.5. Se debió suministrar alcalinidad adicional (NaOH) para recuperar el sistema. Para los días siguientes, dosificando alcalinidad, fue posible mantener un pH menos ácido y promover la generación de gas. Para esta fase no fue posible medir la alcalinidad del efluente final debido a que era inferior al límite de medición del método analítico. Esto demuestra que la generación de ácidos orgánicos (presumiblemente acetato en el caso de la glucosa) era intensa durante esta fase, y que para mantener la carga aplicada en el tiempo es necesario suministrar alcalinidad adicional al sistema. Por otro lado, la remoción de DQO fue elevada, en torno de 88%, con una condición de ORP típica para condiciones anaeróbicas (valores negativos, cercanos a -150mV).

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para el reactor anaeróbico en una etapa operando con agua residual ordinaria.



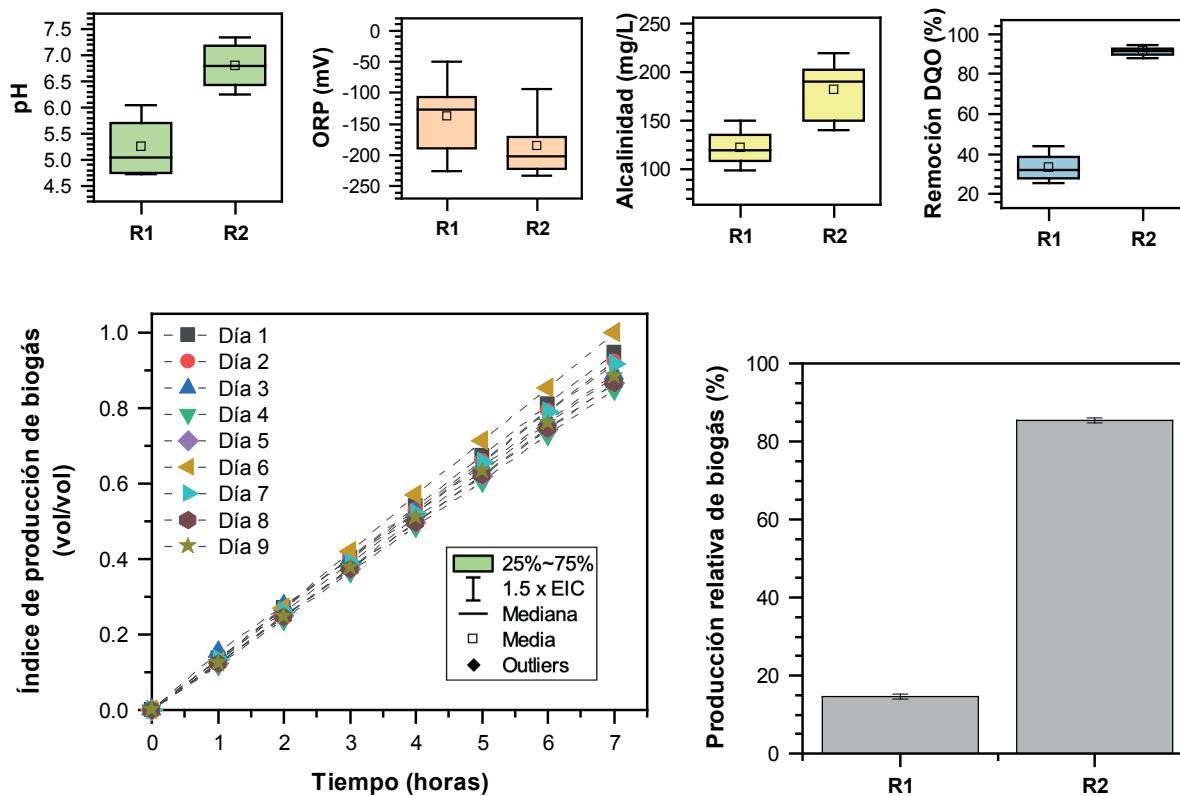
**Figura 5.** Operación del reactor anaeróbico en una etapa para el agua residual ordinaria

La Figura 5 muestra que esta condición fue muy distinta a la del agua residual sintética. En primer lugar, aunque sí hubo una dispersión importante en la generación de gas, la producción de gas alcanzó, de forma general, valores más elevados para el agua residual ordinaria (hasta 3-4 veces mayor). En este caso no fue necesario suministrar alcalinidad adicional, la presente en el agua residual ordinaria fue suficiente para mantener un pH cercano al neutro, y la alcalinidad del efluente no se agotó (valores cercanos a los 250 mgCaCO<sub>3</sub>/L fueron registrados). Además, una remoción de DQO muy similar, de aproximadamente 90% fue observada, con valores de ORP menores (-300 mV), lo que indica condiciones reductoras más intensas, que propician el proceso de digestión anaeróbica.

En relación con las diferencias observadas entre ambos sustratos, considerando que las dos aguas residuales tenían una DQO similar (baja concentración, o típica de las aguas residuales ordinarias), es posible afirmar que éstas se debieron a la naturaleza del sustrato evaluado. Con respecto a este punto, la literatura científica [19], [20] cataloga a las aguas residuales ordinarias como un sustrato complejo, de biodegradación más compleja que los sustratos simples, como la glucosa. En particular, en el caso de la glucosa, la fase de hidrólisis no es necesaria, por ser un sustrato soluble, lo que acelera su conversión en ácidos orgánicos, consume la alcalinidad disponible y baja rápidamente el pH [10]. Por este motivo, en el caso de la glucosa, la operación en una etapa fue inestable, a pesar de que la carga orgánica era baja.

### Digestión anaeróbica en dos etapas

En la Figura 6 se muestra el resultado obtenido para la fase de digestión anaeróbica en dos etapas del sustrato artificial (glucosa). El primer reactor ( $R_1$ ) fue operado como un sistema de fase acidogénica y acetogénica, mientras que el segundo reactor ( $R_2$ ) fue operado para la fase metanogénica, aprovechando el efluente acidificado de  $R_1$ .



**Figura 6.** Operación del reactor anaeróbico en dos etapas para el agua residual sintética (glucosa)

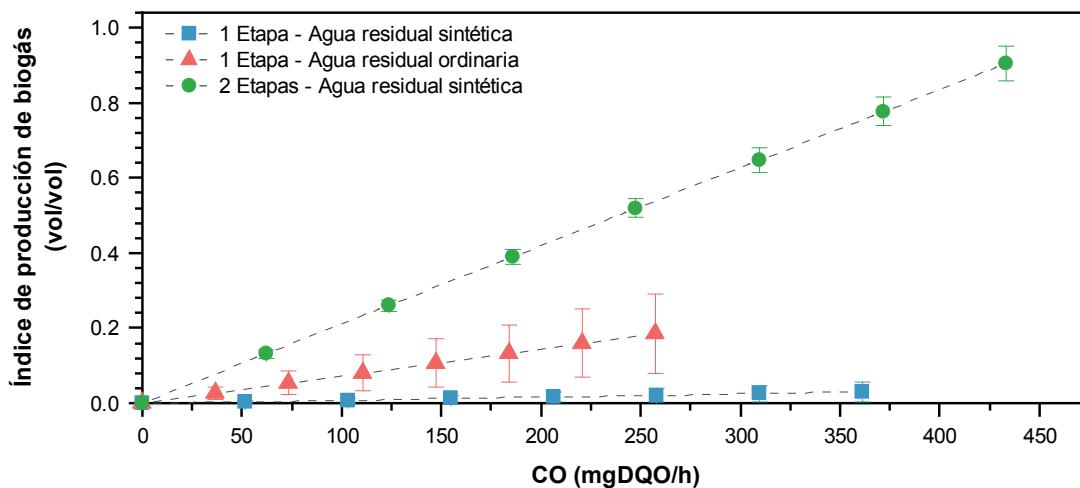
En la Figura 5 se observa el desempeño de ambos reactores. Las diferencias entre el pH, alcalinidad y remoción de DQO muestran que ambos reactores operaron en fases distintas, siendo que en  $R_1$  se generaron ácidos orgánicos (bajo pH, menor alcalinidad, menor remoción de DQO), mientras que estos ácidos fueron convertidos en biogás en  $R_2$  (producción de 85% del biogás en este reactor). Además, este modo de operación fue el que más biogás generó (hasta 9 y 3 veces el de la fase 1 y 2, respectivamente), y fue muy consistente (presentó muy poca variabilidad) a lo largo de las 9 repeticiones.

En ese sentido, para la glucosa, que es un sustrato fácilmente biodegradable de rápida acidificación, la operación en dos etapas fue muy ventajosa, permitiendo aumentar la producción de gas y estabilidad del sistema, aun cuando la concentración en términos de materia orgánica era baja. Este resultado es consistente con lo observado con efluentes de elevada carga orgánica reportados en la literatura [11], [12], [21]. También, para efluentes sintéticos de baja carga, Guerrero et al. (2009) [22] llegaron a una conclusión similar, para temperaturas entre 21°C y 24°C.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, no fue posible operar el sistema en dos etapas para el agua residual ordinaria, debido a que el reactor R<sub>1</sub> no se acidificó a pesar de distintos esfuerzos (suministro de ácido sulfúrico para pre-acidificar, recirculación del efluente). Según Álvarez et al. (2008) [14], para la acidificación del agua residual ordinaria se requieren TRH menores a los probados, de unas 2 horas, incluso a temperaturas más bajas que las típicas de un clima tropical. Sin embargo, considerando la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica de las aguas residuales ordinarias en una etapa (Figura 5) vale la pena preguntarse sobre la necesidad de contar con dos etapas en este caso, según resultados obtenidos en otras investigaciones con agua residual municipal en climas tropicales o calientes [15], [20].

#### *Análisis comparativo del desempeño según el tipo de agua residual*

Con el fin de facilitar la comparación entre las fases experimentales evaluadas, la Figura 7 presenta la generación promedio de gas en función de la carga orgánica promedio aplicada en el sistema anaeróbico, para una y dos etapas, agua residual sintética y ordinaria. El gráfico muestra la desviación estándar de los datos experimentales, para las 9 repeticiones de cada fase experimental.



**Figura 7.** Producción relativa de biogás normalizada con respecto a la carga orgánica aplicada en el sistema

Según se observa en la Figura 7, para condiciones normalizadas de carga orgánica aplicada, queda clara la diferencia de generación de gas entre las distintas fases del experimento. El efluente sintético fácilmente biodegradable produjo muy poco biogás cuando el sistema se operó en una etapa (inestabilidad), pero fue el que produjo mayor cantidad de biogás cuando se operó en dos etapas. El agua residual ordinaria produjo una cantidad de biogás intermedia entre ambas condiciones, aproximadamente un 30% de la del agua residual sintética en dos etapas.

No fue posible encontrar en la literatura técnica estudios que compararan de forma integral la digestión en una y dos etapas de las aguas residuales ordinarias y sintéticas de baja carga como en este trabajo. Sin embargo, revisando algunos estudios que evaluaron el proceso de digestión anaeróbica en dos etapas [14], [15], [21], [22], es posible confirmar que, para efluentes rápidamente biodegradables (como la glucosa), la digestión en dos etapas es ventajosa (aun cuando el agua posee baja carga orgánica) para aportar estabilidad al proceso y aumentar la generación energética; mientras que para las aguas residuales ordinarias, de lenta biodegradación, esta condición no sería tan ventajosa (aunque es posible), debido a que

la digestión en una etapa ya es estable, y una posible mayor producción energética podría no compensar la mayor complejidad operacional. Esto es particularmente importante para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, donde la simplicidad operacional es un aspecto clave para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento.

## Conclusiones y/o recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que la digestión anaeróbica en dos etapas es ventajosa para el agua residual sintética, la cual estaba compuesta por glucosa de fácil biodegradación. La separación en dos etapas permitió una estabilidad del proceso que maximizó la generación de biogás. Por el contrario, la digestión en una sola etapa de la glucosa produjo los resultados más inestables y la menor producción de biogás, a pesar del suministro de alcalinidad. Esto se debe a la fácil biodegradación de la glucosa que genera ácidos orgánicos muy rápidamente y consume la alcalinidad presente en el medio. Para las aguas residuales ordinarias el comportamiento fue muy distinto. En este caso, para las condiciones experimentales evaluadas, no fue posible operar el sistema en dos etapas, y la operación en una sola etapa fue muy estable. Esto se debería a la complejidad del sustrato, compuesto por diferentes tipos de materia orgánica, que no son tan rápidamente transformados en ácidos orgánicos. Esto permite que la misma alcalinidad del agua residual permita mantener condiciones de pH estables. En ese sentido, para este tipo de aguas residuales no parece necesario la operación en dos etapas, considerando el aumento en la complejidad del sistema.

## Agradecimientos

Se agradece la colaboración de las personas operadores y administradoras de las plantas de tratamiento de aguas residuales que facilitaron el acceso al agua residual ordinaria utilizada en este trabajo, particularmente al señor Josué Martínez y al Ing. Ernesto Jiménez de AyA.

Este trabajo fue desarrollado dentro del marco del proyecto C3608 de la Universidad de Costa Rica, con financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación de esta Universidad.

## Referencias

- [1] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, "Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica", Revista de Ciencias Ambientales, vol. 53, núm. 2, pp. 97–110, 2019, doi: 10.15359/rca.53-2.5.
- [2] E. Centeno Mora, N. Cruz Zúñiga, y P. Vidal Rivera, "Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad", vol. 34, núm. 1, pp. 2215–2652, 2024, doi: 10.15517/ri.v34i1.55222.
- [3] D. Mora y C. F. Portuguez, "Agua para uso y consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2019: brecha al 2023", San José, 2020.
- [4] AYA, MINAE, y MINSA, Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales. San José, 2016.
- [5] C. A. L. Chernicharo, J. B. van Lier, A. Noyola, y T. Bressani Ribeiro, "Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges", Rev Environ Sci Biotechnol, vol. 14, núm. 4, pp. 649–679, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9377-3.
- [6] J. B. van Lier, F. P. van der Zee, C. T. M. J. M. J. Frijters, y M. E. Ersahin, "Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment", Rev Environ Sci Biotechnol, vol. 14, núm. 4, pp. 681–702, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9375-5.
- [7] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, "Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en pequeñas comunidades de Costa Rica", Revista Ingeniería, vol. 30, núm. 1, pp. 1–24, 2019, doi: 10.15517/ri.v30i1.38898.

- [8] V. Solano Ramírez, E. Centeno Mora, y P. Vidal Rivera, "Cierre de ciclos de nutrientes y generación de energía por medio del tratamiento anaerobio de las aguas residuales ordinarias : Estudio de caso en Las Juntas de Abangares", Revista de Ciencias Ambientales, vol. 57, núm. 1, pp. 1–29, 2023, doi: <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.1>.
- [9] C. A. L. Chernicharo y T. Bressani, Eds., Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation. IWA Publishing, 2019. doi: 10.2166/9781780409238.
- [10] C. A. L. Chernicharo, Anaerobic Reactors, vol. 6, núm. 0. Belo Horizonte, Brasil: IWA Publishing, 2007. doi: 10.2166/9781780402116.
- [11] G. Srisowmeya, M. Chakravarthy, y G. Nandhini Devi, "Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 119. Elsevier Ltd, el 1 de marzo de 2020. doi: 10.1016/j.rser.2019.109587.
- [12] E. Holl et al., "Two-stage anaerobic digestion: State of technology and perspective roles in future energy systems", Bioresource Technology, vol. 360. Elsevier Ltd, el 1 de septiembre de 2022. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127633.
- [13] E. Holl et al., "Two-stage anaerobic digestion: State of technology and perspective roles in future energy systems", Bioresour Technol, vol. 360, p. 127633, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127633>.
- [14] J. A. Álvarez, E. Armstrong, M. Gómez, y M. Soto, "Anaerobic treatment of low-strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions", Bioresour Technol, vol. 99, núm. 15, pp. 7051–7062, oct. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.01.013.
- [15] M. Halalsheh et al., "Treatment of strong domestic sewage in a 96 m<sup>3</sup> UASB reactor operated at ambient temperatures: Two-stage versus single-stage reactor", Bioresour Technol, vol. 96, núm. 5, pp. 577–585, mar. 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.014.
- [16] Armfield, "Instruction Manual: Anaerobic Digester W8". Armfield UK, Londres, Reino Unido, 2015.
- [17] AWWA, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22a ed. Washington D.C: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), 2012.
- [18] M. von Sperling, Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, Fourth. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.
- [19] G. Lettinga, My Anaerobic Sustainability Story. Wageningen: LeAF, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.br/books?id=k4wYzQEACAAJ>
- [20] G. Zeeman y G. Lettinga, "The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level", Water Science and Technology, vol. 39, núm. 5, pp. 187–194, mar. 1999, doi: 10.2166/wst.1999.0238.
- [21] V. T. Mota y M. Zaiat, "Two- vs. single-stage anaerobic reactors: Evaluation of effluent quality and energy production potential using sucrose-based wastewater", Water Science and Technology, vol. 78, núm. 9, pp. 1966–1979, dic. 2018, doi: 10.2166/wst.2018.470.
- [22] L. Guerrero et al., "Performance evaluation of a two-phase anaerobic digestion process of synthetic domestic wastewater at ambient temperature", J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng, vol. 44, núm. 7, pp. 673–681, jun. 2009, doi: 10.1080/10934520902847794.

## Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.