

Evaluación de la actividad metanogénica específica rápida en lodo granular de industria de bebidas no alcohólicas: estudio preliminar

Artículo largo



Sebastián Méndez Corredor* ; Tatiana R. Chaparro 

Grupo de Investigación en Agua y Energía-AyE, Facultad de Ingeniería,
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

*est.sebastian.mendez@unimilitar.edu.co

Resumen

La digestión anaerobia es una de las tecnologías más empleadas a nivel mundial para el tratamiento de aguas residuales, en la cual, con ausencia de oxígeno, se logra estabilizar la materia orgánica y generar biogás que puede ser reutilizado como combustible. Con ensayos de biodegradabilidad anaerobia se puede conocer la máxima capacidad de producción de metano tanto de un grupo de microorganismos como también del sustrato y lograr mejoras de rendimiento y operación en los biodigestores anaerobios operando en condiciones reales. La falta de datos y metodologías para los diferentes ensayos de biodegradabilidad hace que el análisis y comparación de datos sea cada vez más difícil. En este sentido, en esta investigación se muestran resultados preliminares sobre la realización de la prueba de actividad metanogénica específica utilizando la metodología rápida propuesta en la literatura. Esta prueba se realizó a una muestra de lodo granular proveniente del biodigestor anaerobio de una fábrica de bebidas no alcohólicas. Finalmente, se obtuvieron valores de AME de 0,014 y 0,015 g DQO/gSV que permitieron ampliar la base de datos para ensayos AME bajo distintas condiciones.

Palabras clave:

Digestión anaerobia;
Lodo granular; Prueba rápida de AME.

Evaluation of specific rapid methanogenic activity in granular sludge from the non-alcoholic beverage industry: Preliminary study

Abstract

Anaerobic digestion is one of the most used technologies worldwide for wastewater treatment where, in the absence of oxygen, organic matter is stabilized and biogas is generated, which can be reused as fuel. Anaerobic biodegradability tests are commonly used to determine the maximum capacity of methane production from a group of microorganisms as well as from the substrate, achieving improvements in performance and operation in anaerobic biodigesters in real life settings. The lack of data and methodologies for the different biodegradability tests makes the analysis and comparison of data increasingly difficult. In this context, this research shows preliminary results on the performance of the specific methanogenic activity using the rapid methodology proposed in the literature. This test was applied to a sample of granular sludge from the anaerobic biodigester of a non-alcoholic beverage factory, adapting the 3-day rapid application method. Finally, SMA values of 0.014 and 0.015 g COD/gVS were obtained, thus expanding the database for SMA tests under different conditions.

Keywords:

Anaerobic digestion;
Granular sludge; AME rapid test.

Forma de citar: Méndez Corredor, S., & Chaparro, T. R. (2022). Evaluación de la actividad metanogénica específica rápida en lodo granular de industria de bebidas no alcohólicas: estudio preliminar. *RedBioLAC*, 6(2), 24-31.

Introducción

La aplicación de la tecnología anaerobia ha tenido un crecimiento significativo en los últimos años en América Latina y el mundo, sin embargo, la realización y estabilidad de los procesos de digestión anaerobia (DA) son sensibles a múltiples factores ambientales incluidos el pH, la temperatura, la presencia de macro y micronutrientes, así como de inhibidores. (Lu *et al.*, 2018). La DA es un proceso biológico por el cual los lodos residuales, por acción de un grupo de bacterias y en ausencia de oxígeno, se descomponen en biogás y una mezcla de productos minerales (Aguilar-Benítez & Blanco, 2018). La DA es considerada como una de las tecnologías más apropiadas para el tratamiento de agua residual y residuos sólidos debido a la cantidad de biogás producido, su relevancia económica y capacidad de resolver simultáneamente los problemas de utilización de residuos orgánicos y contaminación ambiental (Jaimes-Estévez *et al.*, 2020). En comparación con otras tecnologías, la DA está relativamente más desarrollada y cuenta con múltiples ventajas: (1) se caracteriza por su baja tasa de producción de lodo, alta capacidad de carga orgánica y alta eficiencia de tratamiento; (2) puede convertir la materia orgánica en microbiomasa acompañada con una fuente sustentable de energía en forma de biogás, el cual puede ser utilizado para reemplazar al gas natural y el petróleo como combustible; (3) puede reducir olores y devolver nutrientes al suelo (Cheng *et al.*, 2021).

La caracterización de los residuos sólidos es un paso necesario antes de que puedan utilizarse en la digestión anaerobia. Las diferentes cantidades de compuestos (carbohidratos, proteínas, lípidos y fibras) y la biodegradabilidad anaerobia (capacidad de producir metano) son información importante y necesaria para caracterizar los residuos. (Lesteur *et al.*, 2010). Los ensayos de biodegradabilidad anaerobia se utilizan para establecer la biodegradabilidad anaerobia, determinar el potencial de metano final de los desechos, pero también para determinar la tasa de biodegradación en general (Angelidaki & Sanders, 2004). En muchos de los estudios de biodegradabilidad anaerobia, los resultados para el mismo sustrato suelen diferir entre laboratorios, por lo que se necesita mucho trabajo para estandarizar cada método (Strömberg *et al.*, 2014). La biodegradabilidad anaerobia se evalúa generalmente por medio de una prueba biológica, la prueba de potencial bioquímico de metano (BMP), (Lesteur *et al.*, 2010), se utiliza específicamente para obtener la producción máxima de metano proveniente del sustrato, así como la prueba de actividad metanogénica específica (AME), se enfoca en la capacidad máxima de producción de metano de un grupo de microorganismos. Estos ensayos brindan información crucial para el seguimiento exitoso de operaciones de DA. Esto será especialmente importante a medida que aumente la gama de materias primas tratadas mediante digestión anaeróbica, las condiciones operativas del digestor se intensifiquen para maximizar el uso de

la infraestructura existente, y aumente la adopción de la codigestión para desviar los residuos de los vertederos e impulsar el suministro local de energía renovable (Astals *et al.*, 2020). Estos ensayos son complementarios y se analizarán en paralelo con el fin de obtener una información precisa del comportamiento de un sistema sometido a procesos de digestión anaerobia.

Uno de los ensayos de biodegradabilidad anaerobia más utilizados es la actividad metanogénica específica o AME por sus siglas. Este hace parte de los bioensayos anaerobios realizados con el fin de cuantificar la máxima capacidad de producción de metano producida por un grupo de microorganismos que se encuentran en lodos anaerobios y condiciones controladas de laboratorio. Es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema (Torres Lozada & Pérez, 2010). La AME determina la capacidad de producción de metano del lodo para un sustrato específico en el nivel de concentración donde la disponibilidad de sustrato no es un factor limitante (Hussain & Dubey, 2014).

Con el fin de facilitar el análisis de resultados en los ensayos de biodegradabilidad anaerobia, se han desarrollado diferentes estudios que buscan encontrar una optimización de las pruebas y así lograr la estandarización de estas. Entre estos estudios se destaca la metodología propuesta por Astals *et al.* (2015) donde se desarrolla una prueba rápida para el cálculo de la actividad metanogénica específica. Este estudio, mencionado anteriormente, tiene como objetivo validar una prueba rápida de inhibición y toxicidad en sistemas anaerobios, para esto es necesario optimizar la obtención de la AME, empleando un montaje experimental que permita su obtención en un periodo aproximado de tres días. Esta metodología ha sido citada por varios autores, no solo como aplicación a ensayos de inhibición y toxicidad, sino principalmente como metodología de aplicación para los ensayos de biodegradabilidad anaerobia AME y BMP. Este es el caso de Buhlmann *et al.* (2019) y Lee *et al.* (2017) quienes basan sus estudios en la implementación de las condiciones propuestas por Astals *et al.* (2015) para facilitar el ensayo, el análisis y la comparación de resultados. Así mismo, en el territorio colombiano se han realizado estudios donde se aplica esta metodología en inóculos anaerobios provenientes de biodigestores rurales como es el caso de (Castro & Diaz, 2018).

Unas de las grandes variables cuando se realizan ensayos de biodegradabilidad anaerobia son la característica y composición del inóculo, estas dependen principalmente de su naturaleza, la tecnología y del sustrato que se esté procesando. La industria de las bebidas no alcohólicas es una de las mayores industrias donde se aplican tecnologías anaerobias debido a las altas cargas orgánicas generadas en sus procesos.

El objetivo principal de este estudio consistió en determinar la actividad metanogénica específica en una muestra de lodo anaerobio procedente de una planta procesadora de bebidas no alcohólicas, con el fin de desarrollar la metodología de [Astals et al. \(2015\)](#) bajo condiciones específicas. De modo que se amplíe la cantidad de datos y pruebas que existen en Colombia acerca de los ensayos de biodegradabilidad anaerobia y buscando que en un futuro se logre la estandarización de estos métodos.

Metodología

Características y preparación del inóculo

La muestra de lodo anaerobio utilizado en este ensayo fue obtenida del biodigestor anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa productora de bebidas no alcohólicas, ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia.

En la planta de tratamiento de aguas residuales se reciben los residuos de tres líneas de producción: producción de jugos, producción de gaseosas y desperfectos, esta última línea corresponde al agua cruda resultante de los procesos de fabricación que no cumplen los estándares requeridos para la distribución. Los residuos resultantes de estas tres líneas se mezclan en los denominados tanques clarificadores que reciben un caudal promedio de 13 L/s. Posteriormente el agua llega a un tanque homogenizador de 285 m³, el cual trabaja con un tiempo de detención hidráulica de 7 h. Luego de estos tratamientos, el agua residual entra en el reactor anaerobio de donde se obtuvieron las muestras de lodo que posteriormente fueron preservadas y llevadas al laboratorio para su caracterización y preparación. Se tomó una muestra de lodo de 1 litro para cada uno de los experimentos. La toma de muestras se realizó en el mes de octubre de 2019, para el experimento 1 y en el mes de febrero de 2020 para el experimento 2.

La muestra de lodo obtenida se caracterizó por ser granular. El lodo granular es un lodo difícil de tratar debido a su actividad altamente inestable. La muestra obtenida permitió identificar las impurezas del lodo, como se puede observar en la [Figura 1](#), por lo cual se realizó una limpieza previa al ensayo, en donde se dejó decantar la muestra durante unos minutos con el fin de eliminar las impurezas y así obtener una muestra representativa.

La preparación del inóculo se hizo siguiendo las recomendaciones de [Astals et al. \(2015\)](#) que consisten en obtener una concentración de inóculo de 10g SV/L para una concentración de 2g Ac/L y así mantener una relación inóculo/sustrato de 5g SV/g Ac. La concentración de sólidos volátiles iniciales del inóculo es de 40g SV/L, por lo que se debe hacer una dilución de la muestra inicial hasta llegar a 10g SV/L. La dilución puede hacerse con agua destilada o con el residuo líquido obtenido en el biodigestor anaerobio. Una vez obtenida la concentración requerida, se deja la

muestra en condiciones de ensayo ($T = 37 \pm 1$ °C) durante 24 h previas al inicio de la prueba con el fin de lograr una adaptación del inóculo.

Determinación de la fuente de carbono

La concentración inicial de la fuente de carbono fue tomada según lo sugerido por [Astals et al. \(2015\)](#) en donde se demostró que la concentración óptima es de 2g Ac/L representado en acetato de sodio para una concentración de inóculo de 10 gSV/L. Esta relación de inóculo/sustrato debe mantenerse sin importar el volumen de muestra.

Montaje del ensayo AME

El ensayo de actividad metanogénica específica (AME), se realizó en botellas de suero de 100 ml a condiciones mesofílicas. Para realizar la digestión anaerobia se utilizó un volumen de trabajo de 67 ml en cada botella, dejando así un *headspace* de 33 mL correspondiente a 1/3 de la capacidad total del reactor, como se puede observar en la [Figura 2](#). Estos volúmenes pueden variar dependiendo del tamaño de la botella a utilizar.



Figura 1 | Muestra de inóculo sin preparar. Fuente: Los autores



Figura 2 | Esquema del reactor de ensayo. Fuente: Los autores

Posteriormente se calculó el volumen de sustrato que depende de la concentración de acetato que se busca en el reactor, la cual se aporta en una solución de acetato de

sodio, y del volumen de mezcla o de trabajo conforme la ecuación 1.

$$Vol\ sustrato\ [ml] = \frac{2g/l\ CH_3COO * Vol\ mezcla\ [ml]}{200g/CH_3COO} \quad (1)$$

El volumen de sustrato corresponde a la cantidad de solución de acetato de concentración 200 mg/l aplicada en cada reactor.

Y finalmente se calculó el volumen de inóculo de la diferencia entre el volumen de mezcla y el volumen de sustrato, siguiendo lo indicado en la ecuación 2.

$$Vol\ inóculo\ [ml] = Vol\ mezcla\ [ml] - Vol\ sustrato\ [ml] \quad (2)$$

Se obtuvo un volumen de inóculo de 67 mL en los reactores de blanco y 66,33 mL en los reactores de muestra.

Una vez los frascos estuvieron completos, se purgaron con la mezcla estándar de N_2CO_2 (80/20) durante 1 minuto, para garantizar condiciones anaerobias. Posteriormente se ensambló el montaje en una cámara de incubación a una temperatura de 37 +/-1 °C.

La producción y composición del biogás fue determinada a partir del método volumétrico de desplazamiento de gases según lo recomendado por [Torres Lozada & Pérez \(2010\)](#). La producción de metano fue determinada mediante el desplazamiento volumétrico de una solución de Hidróxido de Sodio (NaOH) 1N y expresada en gramos de la demanda química de oxígeno (gDQO) bajo condiciones estándar (0 °C, 1bar).

Se realizó agitación manual del reactor durante 30 segundos previo a la toma del volumen desplazado. Los experimentos se detuvieron a los tres días del inicio del montaje aproximadamente según lo descrito en [Astals et al. \(2015\)](#) ya que, a pesar de no haber finalizado la producción de biogás, este tiempo es suficiente para que en la gráfica de producción acumulada y tiempo de operación se refleje una pendiente significativa para el cálculo de la AME.

Los reactores fueron caracterizados con ensayos de demanda química de oxígeno (DQO), alcalinidad parcial (AP) y pH según los métodos 5220D, 2320 y 4500-H⁺ del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater respectivamente. Los ensayos de pH y Alcalinidad Parcial fueron utilizados como monitoreo de las condiciones anaerobias, mientras que la DQO se realizó como ensayo de la eficiencia del sistema.

Análisis de resultados

Se realizaron dos ensayos AME denominados experimento 1 y experimento 2, en los cuales solo se diferencia el día de toma de muestra y de realización del ensayo.

Cada uno de los experimentos consta de 5 reactores, 2 correspondientes a los blancos (B1 y B2), necesarios para calcular la producción endógena de metano, y 3 reactores de muestra (R1, R2 y R3).

Los valores de AME fueron determinados como la pendiente de la gráfica de volumen acumulado de metano (eje y) y tiempo (eje x), aplicando un ajuste de regresión lineal según lo recomendado en [Astals et al. \(2015\)](#).

$$AME, \frac{gDQO}{gSV} \cdot d = \frac{\frac{dV\ CH_4}{dt}}{SV} \cdot d \quad (3)$$

En dónde;

$\frac{dV\ CH_4}{dt}$: pendiente de la curva de producción de metano expresada en ml de CH_4 /L.

SV: masa de lodo inicial en cada reactor, expresado en, g SV/L.

Resultados y discusión

Experimento 1

La composición de los reactores en el experimento 1 se encuentra resumida en la [Tabla 1](#). Cada reactor contiene la mezcla de inóculo y sustrato calculado anteriormente.

Tabla 1 | Composición de los reactores del Experimento 1. Fuente: Los autores

Parámetro	Inicial					Final				
	B1	B2	R1	R2	R3	B1	B2	R1	R2	R3
pH	7,4	7,4	7,24	7,24	7,24	7,6	7,6	8	8	8
DQO (mg/L)	331	398	2367,3	2179,7	2367,3	180	179	120	141,5	145
AP (mgCaCO3/L)	446,25	446,25	327,5	327,5	327,5	325	325	1000	1000	1000

En la **Figura 3** se presenta la producción acumulada de metano vs tiempo. Esta figura se realizó utilizando la media aritmética de los valores obtenidos en las muestras de ensayo del experimento 1.

Se observa un crecimiento constante en la producción volumétrica de metano posterior a las primeras 4 horas. Dentro de las 74 horas analizadas se aprecia que la producción volumétrica de metano no se estabilizó, lo que refleja que los resultados se encuentren en la franja de crecimiento exponencial. Las mayores producciones de metano se presentaron entre las horas 4 y 22 y las horas 56 y 74, en donde se presentó un desplazamiento de casi 10 mLde NaOH.

La producción de metano alcanzó un máximo de 26,5 mL de NaOH desplazado, lo que refleja un valor de AME total de 0,015 gDQO/gSV.

La **Tabla 2** presenta el resultado de la actividad metanogénica específica del experimento 1, en donde se evidenció que el reactor de muestra 1 varía en diferencia con el 2 y 3, por lo que se omitió para realizar el cálculo de la media. La mayor actividad metanogénica, se presentó en el reactor 3 con un valor neto, es decir, sin contar con la producción endógena, de 0,32 gDQO/gSV; en este ensayo se obtuvo una remoción del 93,8 % de DQO. El sustrato se consumió casi por completo.

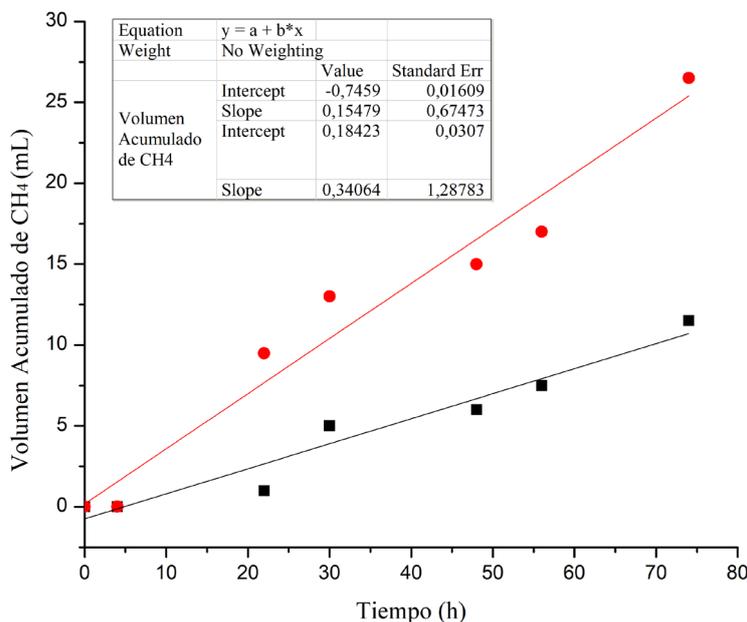


Figura 3 | Producción acumulada de metano vs Tiempo. Experimento 1: Blanco (■) Reactores (●). Fuente: Los autores

Tabla 2 | Resultados Experimento 1. Fuente: Los autores

Reactor	AME (gDQO/gSV)	Remoción DQO (%)
B1	0,012	45,0
B2	0,016	54,3
R1	0,034	95,0
R 2	0,030	92,3
R 3	0,032	93,8

Los valores de pH evaluados al inicio y final del ensayo no presentaron variaciones significativas, fluctuando entre las 7 y 8 unidades tanto para los reactores de blanco como para los reactores de muestra. La alcalinidad parcial presentó una disminución en los reactores de blanco y llegó a un valor mínimo de 325 mg/L, mientras que en los reactores de muestra presentó un aumento al final del ensayo con un máximo de 1000 mg/L.

Experimento 2

La composición de los reactores en el experimento 2 se encuentra resumida en la [Tabla 3](#). Cada reactor contiene la mezcla de inóculo y sustrato calculado anteriormente.

Tabla 3 | Composición de los reactores del Experimento 2. Fuente: Los autores

Parámetro	Inicial					Final				
	B1	B2	R1	R2	R3	B1	B2	R1	R2	R3
pH	7,85	7,85	7,66	7,66	7,66	6,94	6,94	7,52	7,52	7,52
DQO (mg/L)	397	402	2725,2	2455,5	2725,2	153	156	168	166	166
AP (mgCaCO3/L)	1262,5	1262,5	1515	1515	1515	1005	1005	2730	2730	2730

En la [Figura 4](#) se presenta la gráfica de producción acumulada de metano vs tiempo. Esta gráfica se realizó utilizando la media aritmética de los valores obtenidos en las muestras de ensayo del experimento 2.

Se aprecia un ajuste a la regresión lineal durante las 74 horas de ensayo en donde el crecimiento en la producción volumétrica de metano fue constante. Entre las 4 y las 22 horas existió el mayor aumento en la producción metanogénica con más de 10 ml de NaOH desplazados. La

producción metanogénica alcanzó un máximo de 25,5 ml reflejados en un valor de AME de 0,014 gDQO/gSV.

La [Tabla 4](#) presenta el resultado del ensayo de actividad metanogénica específica del experimento 2, donde se observa que el reactor 2 difiere en relación con el 1 y 3 por lo que se omite en el cálculo de la media. La mayor actividad metanogénica se presentó en el reactor 3 con un valor de AME de 0,032 gDQO/L y una remoción de casi 94 % de DQO.

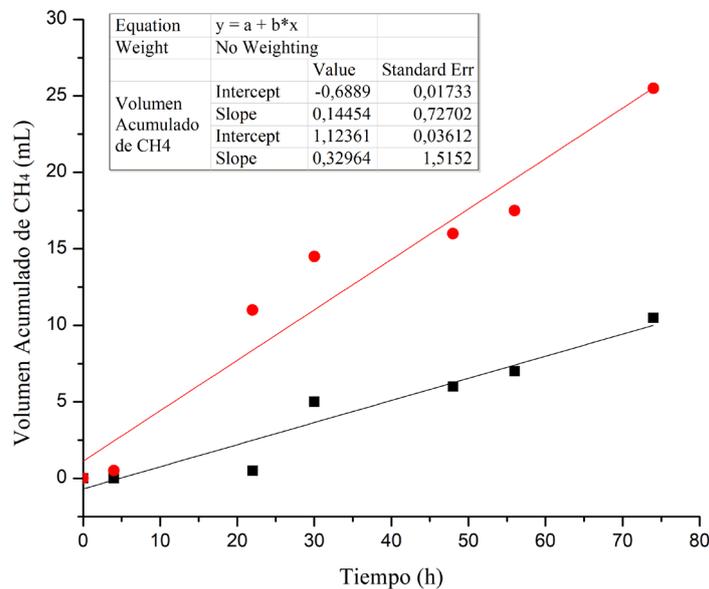


Figura 4 | Producción acumulada de metano vs Tiempo. Experimento 2: Blanco (■) Reactores (●). Fuente: Los autores

Tabla 4 | Resultados Experimento 2. Fuente: Los autores

Reactor	AME (gDQO/gSV)	Remoción DQO (%)
B1	0,012	61,5
B2	0,014	61,2
R1	0,028	93,8
R2	0,020	93,2
R3	0,032	93,9

Las condiciones evaluadas al final del ensayo no presentaron variaciones significativas, los valores de pH variaron entre las 7,5 y 8 unidades. La alcalinidad parcial fue mayor al inicio de este ensayo, con valores para blanco y reactores de muestra de 1262 mg/L y 1515 mg/L respectivamente. Su comportamiento al final del ensayo fue similar y llegó a un mínimo para blanco de 1005 mg/L y un máximo en los reactores de muestra de 2730 mg/L.

La comparación de datos se realizó con base en los resultados presentados por *Astals et al. (2015)* y se considera que se cumplen los mismos parámetros de operación, así como la concentración de inóculo y sustrato en el ensayo. Los valores de AME en los experimentos 1 y 2 no superaron los 0,015 gDQO/gSV lo que significa valores bajos de actividad metanogénica en comparación con los valores comparativos que alcanzaron valores de hasta 0,14 g DQO/gSV. Los valores bajos de AME indican que la capacidad metanogénica del lodo analizado es baja, esto se puede deber a la proveniencia del lodo o a errores en el diseño experimental o toma de datos. Al analizar las características del lodo se evidenció que tanto el origen como la composición del lodo son diferentes en relación con lo evaluado en *Astals et al. (2015)* por lo que puede influir en la variación de los datos.

Se analizó la composición del biogás producido en el digestor anaerobio de la fábrica de bebidas y se encontró que existe una relación de 60 % CO₂ y 40 % CH₄ en su máxima operación, pero para las fechas que fue realizado el ensayo, las condiciones operativas del biodigestor no eran estables y esto pudo haber afectado los resultados del ensayo.

Por otra parte, la tendencia del crecimiento en la producción acumulada de metano coincide con lo propuesto por *Astals et al. (2015)* donde el modelo se ajusta a una regresión lineal y alcanza su máxima pendiente en un intervalo de 12 horas luego de iniciado el ensayo. La degradación en términos de DQO también fue correcta ya que se demostró que al considerar como sustrato una concentración de 2g Ac L-1, esta ayuda a que el proceso de digestión anaerobia se acelere y se logre una disminución de más del 90 % en los primeros 3 días.

La gran cantidad de variables que presenta este ensayo, así como la dificultad general que existe en los ensayos de biodegradabilidad anaerobia hace que la comparación de los datos obtenidos sea complicada. No obstante, el comportamiento y tendencia de los datos presentan una correlación válida para tener en cuenta en futuras investigaciones. Con base en estos experimentos no se puede confirmar la estandarización del ensayo de AME, por lo que es necesario ampliar la investigación en este campo, y variar tanto las condiciones como los tipos de muestra y métodos de medición. Además, es importante investigar acerca de los diferentes ensayos de biodegradabilidad anaerobia como el

ensayo de biometanización (BMP), que son complementarios al ensayo de actividad metanogénica específica.

Si bien es cierto, el ensayo de AME ha sido estudiado y aplicado en gran cantidad en los últimos años, aún no se ha estandarizado, lo que lleva a un déficit en cuanto a repetibilidad y validación de diferentes condiciones de ensayo. Debido a esto, cada aporte que se realice desde la academia, tal y como se presentó en este estudio, cobra gran importancia para disminuir la incertidumbre que lleva este ensayo. Con los resultados de este estudio se comprobó en forma preliminar, que la prueba puede ser realizada en una muestra de lodo granular de forma correcta y en un menor tiempo. Sin embargo, existen múltiples factores aún por estudiar como son, el origen del lodo, número de repeticiones, y método de medición, para que finalmente se pueda validar la aplicación rápida del ensayo AME en lodo granular y que los resultados sean comparables con la prueba tradicional.

Conclusiones

Se estudió la actividad metanogénica específica de un lodo anaerobio granular proveniente de una planta de tratamiento de bebidas no alcohólicas empleando el método rápido de 3 días. Se encontró que la actividad metanogénica fue baja con un valor máximo de 0,015 gDQO/gSV debido a la proveniencia del lodo y errores en el montaje experimental. Se evidenció que, bajo un tiempo experimental de 75 horas, el sustrato puede ser consumido hasta en un 94 % mientras que la máxima producción de metano bajo condiciones de ensayo se presenta en las primeras 20 horas. Es necesario ampliar la investigación y la aplicación de este método bajo diferentes variables para considerar una estandarización del ensayo AME y promover su aplicación en el territorio colombiano.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo financiero, mediante el proyecto de Investigación IMP- ING 3406 y a los Laboratorios de Saneamiento Ambiental y Calidad de Aguas del Programa de Ingeniería Civil por el apoyo técnico.

Referencias

- Aguilar-Benitez, I., & Blanco, P. A. (2018). Methane recovery and reduction of greenhouse gas emissions: WWTP Nuevo Laredo, Tamaulipas, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 86–111. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. In

- Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 3(2), 117–129. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>
- Astals, S., Batstone, D. J., Tait, S., & Jensen, P. D. (2015). Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Research*, 81, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.063>
- Astals, S., Koch, K., Weinrich, S., Hafner, S. D., Tait, S., & Peces, M. (2020). Impact of storage conditions on the methanogenic activity of anaerobic digestion inocula. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/W12051321>
- Buhlmann, C. H., Mickan, B. S., Jenkins, S. N., Tait, S., Kahandawala, T. K. A., & Bahri, P. A. (2019). Ammonia stress on a resilient mesophilic anaerobic inoculum: Methane production, microbial community, and putative metabolic pathways. *Bioresource Technology*, 275, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.012>
- Castro, L., & Diaz, L. J. (2018). Del digerido de un biodigestor rural a la estruvita Anaerobic digestion from slaughterhouse waste View project. <https://www.researchgate.net/publication/324970438>
- Cheng, Q., Huang, W., Jiang, M., Xu, C., Fan, G., Yan, J., Chai, B., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, S., Xiao, B., & Song, G. (2021). Challenges of anaerobic digestion in China. In *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(11), 3685–3696. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03087-z>
- Hussain, A., & Dubey, S. K. (2014). Specific methanogenic activity test for anaerobic treatment of phenolic wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 52(37–39), 7015–7025. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.823116>
- Jaimes-Estévez, J., Castro, L., Escalante, H., Carrillo, D., Portillo, S., Sotres, A., & Morán, A. (2020). Cheese whey co-digestion treatment in a tubular system: microbiological behaviour along the axial axis. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00988-4>
- Lee, J., Shin, S. G., Han, G., Koo, T., & Hwang, S. (2017). Bacteria and archaea communities in full-scale thermophilic and mesophilic anaerobic digesters treating food wastewater: Key process parameters and microbial indicators of process instability. *Bioresource Technology*, 245, 689–697. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.015>
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G., & Steyer, J. P. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. In *Process Biochemistry*, 45(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.11.018>
- Lu, Y., Liaquat, R., Astals, S., Jensen, P. D., Batstone, D. J., & Tait, S. (2018). Relationship between microbial community, operational factors and ammonia inhibition resilience in anaerobic digesters at low and moderate ammonia background concentrations. *New Biotechnology*, 44, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2018.02.013>
- Strömberg, S., Nistor, M., & Liu, J. (2014). Towards eliminating systematic errors caused by the experimental conditions in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Waste Management*, 34(11), 1939–1948. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.018>
- Torres Lozada, P., & Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 5-14.