

# Codigestión de estiércol de bovino y residuo de poda para la producción de biogás mediante digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio

*Co Digestion of Bovine Manure and Grass Pruning, for the Production of Biogas Through Anaerobic Digestion with Agitation. Laboratory Scale*

Yesica Dayana Giraldo<sup>a\*</sup>, Andrea Lache<sup>b</sup>, María Alejandra Ortíz<sup>a\*</sup>, Adriana Inés Páez<sup>a, c</sup>

## RESUMEN

La implementación de nuevos procesos para el aprovechamiento de la biomasa residual, es una de las prioridades intrínsecas en las metas establecidas dentro de los objetivos de desarrollo sostenible para contribuir a la seguridad energética ambiental. El presente artículo aborda la producción de biogás mediante la codigestión de residuo de poda y estiércol bovino en dos reactores UASB con las mismas dimensiones con sistema de aislamiento térmico y sin calentamiento, operando a una temperatura media de 16°C, diferenciados en la incorporación de un sistema de agitación manual. La relación de las materias primas fueron 1:2 a pH de 6,24 y 7,3, respectivamente con humedad superior al 60%. Se observó la acidificación del sistema sin agitación, lo que inhibió la producción de biogás, mientras que en el sistema con agitación hasta el día 90 produjo 11 L de biogás con 21,11% de metano, lo que mostró el efecto favorable de la agitación en el proceso de digestión anaerobia.

**PALABRAS CLAVE:** digestión anaerobia; reactor UASB; codigestión; biomasa residual; agitación; biogás.

## ABSTRACT

The implementation of new processes for the use of residual biomass is one of the intrinsic goals in the goals established within the objectives of sustainable development to contribute to environmental energy security. This article deals with the production of biogas by co-digestion of bovine waste and bovine manure in two UASB reactors with the same dimensions, with thermal isolation system and without external heating and an average temperature of 16°C, differentiated only because one of them incorporated a manual agitation system. The mixture of pruning residue and cow manure was made with a 1: 2 ratios, a pH of 6.24 and 7.3 (respectively) and a humidity greater than 60%. During the process, it was possible to observe the acidification of the reactor without agitation, which inhibited the production of biogas, while in the system with agitation until day 90, produced 11 L of biogas with a methane composition of 21.11%, which showed the favorable effect of agitation on the anaerobic digestion process.

**KEYWORDS:** anaerobic digestion; UASB reactor; codigestion; waste biomass; agitation; biogas.

a Fundación Universidad de América, Grupo de investigación "Energías Alternativas". Bogotá, Colombia. ORCID Giraldo, Y.D.: 0000-0002-1540-1291; ORCID Ortíz M.A.: 0000-0002-8705-8269; ORCID Páez, A.I.: 0000-0002-2898-9063

b Universidad Manuela Beltrán, "Grupo de investigación aplicabilidad tecnológica". Bogotá, Colombia. ORCID Lache-Muñoz, A.: 0000-0001-6870-7828

c Autor de correspondencia: [adriana.paez@profesores.uamerica.edu.co](mailto:adriana.paez@profesores.uamerica.edu.co)

\* Artículo derivado de la tesis de los autores "Producción de biogás a partir de la codigestión de biomasa residual en un sistema de digestión anaerobia"

Recepción: 23 de noviembre de 2018. Aceptación: 29 de noviembre de 2019

## Introducción

El crecimiento poblacional ha traído consigo problemas de agotamiento de los recursos fósiles (Posso, 2002), el deterioro ambiental, el aumento de la acidificación de los océanos en alrededor el 26% con respecto al siglo anterior y un aumento en la temperatura media global de la superficie terrestre (IPCC, 2014). A causa de estas problemáticas surge la necesidad de plantear alternativas que, entre otras cosas, garanticen la seguridad energética ambiental (Escribano, 2006) o como se ha planteado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se prioricen las fuentes limpias y renovables para la generación de energía (ONU, 2015). Es importante entonces fomentar el desarrollo de procesos y tecnologías que propicien la sostenibilidad ambiental a partir de fuentes renovables disponibles, como la biomasa residual (Fernández, 2007).

La biomasa residual puede clasificarse en húmeda o seca, y, dependiendo de este factor, puede ser aprovechada energéticamente por medio de procesos bioquímicos o termoquímicos. Un tipo de procesamiento bioquímico para la biomasa húmeda es la digestión anaerobia (Secretaría de Energía, 2008). Este proceso consiste en la degradación de la materia orgánica por medio de microorganismos; dicha degradación se da en cuatro etapas secuenciales: hidrolítica, acidogénica, acetogénica y metanogénica, que actúan por medio de reacciones bioquímicas (Rosato, 2018). La finalidad de los sistemas de digestión anaerobios es producir una mezcla de gases, conocida como biogás. Este biogás generalmente es aprovechado a través de la generación de energía eléctrica o de energía térmica en procesos de calefacción (Seadi et al., 2008).

El proceso de digestión anaerobia se puede llevar a cabo en diferentes tipos de reactores, como los *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) o los *Continuous Stirred-tank Reactor* (CSTR). Los reactores UASB suelen operar con un sistema de calentamiento externo que suministra condiciones de temperatura estables y favorables para los microorganismos presentes en el sustrato y propicia una mayor eficiencia del proceso (Fernández-Polanco y Seghezzeo, 2015). Los reactores CSTR, incorporan un sistema de agitación con el fin de homogenizar el sustrato y de esta forma también mejorar la eficiencia del proceso. Este tipo de reactores se ha usado en procesos de codigestión entre residuo de poda y estiércol de bovino; como el desarrollado por Feng et al. (2017), quienes obtuvieron como resultado una cantidad de metano superior al 24% en digestión de una sola fuente de biomasa. Por otro lado, Lache et al. (2016) reportan producciones entre 58 y 64% de CH<sub>4</sub> en sistemas de digestión anaerobia con estiércol bovino. Otros estudios realizados en la producción de biogás con este sustrato y reactor alcanzan cifras de 70% de CH<sub>4</sub> en 123 días (Tabla 1).

Para el presente estudio se llevó a cabo la co-digestión de residuo de poda y estiércol de bovino en dos sistemas de digestión, tomando como referencia el diseño de un prototipo de sistema UASB modificado a partir del diseño desarrollado por Lache et al. (2016) para la producción de biogás. Los dos sistemas operaron de manera simultánea, con el fin de garantizar las mismas condiciones ambientales, pero se implementó un mecanismo de agitación en uno de los sistemas, por lo que en adelante serán denominados BD1 y BD2A, siendo este último el sistema con agitación manual. El estudio estableció la formulación del sustrato y las condiciones de

**Tabla 1.** Estudios realizados con digestión anaerobia usado reactor UASB

Fuente	Biomasa	CH <sub>4</sub> obtenido	Tiempo de retención (días)	Temperatura (°C)
Kaparaju et al. (2010)	Estiércol bovino y poda	67,0% al 70,1% según el mezclado	123 (escala piloto)	55
Feng et al. (2017)	Estiércol bovino y poda	47% al 57%	90	55
Moset et al. (2017)	Estiércol bovino y poda	53% al 55%	116	52
Wahid et al. (2018)	Diferentes tipos de poda	25% al 70% según tipo de poda	57	52

operación y registró los valores de temperatura, pH y carga microbiana. Finalmente, se comparó el efecto de la agitación sobre el proceso de acuerdo con la cantidad y composición de metano del biogás obtenido en los dos montajes experimentales.

## Materiales y métodos

### Caracterización de la biomasa residual

Se recolectaron 3 kg de residuos de poda inmediatamente fueron cortados de las zonas verdes de la Fundación Universidad de América, por método de muestreo aleatorio simple; de igual forma se recolectaron 37,9 L de estiércol de bovino del Frigorífico BLE (Bogotá, DC, 2017), también por método de muestreo aleatorio. La muestra de poda se trituró en un molino hasta que su tamaño de partícula fue inferior a 5 mm de largo.

Se estimó el pH por separado de cada uno de los residuos (estiércol y poda), empleando un pH metro digital (tolerancia  $\pm 0,1$  pH) y se determinó la humedad por método de prueba estándar para la determinación de humedad, según lo establece la norma ASTM D-2216-98 (ASTM, 2000).

### Formulación del sustrato y condiciones de operación

Los sistemas BD2 y BD2A, fueron alimentados cada uno hasta el 70% del volumen del digestor por la mezcla de sustrato; el 30% restante se dejó libre para dar espacio al biogás producido (Martina et al., 2005). Según esto, se establecieron cantidades de estiércol de bovino, residuo de poda y agua correspondientes al 70%, manteniendo la relación 3:1 de agua y biomasa (Varnero, 2011). Una vez preparado el sustrato, se tomó una muestra para analizar relación C/N, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales y sólidos totales.

Se estableció que la temperatura del sustrato estaría entre un rango de 13 - 18°C y que el valor del pH variaría dentro del rango 6-8, dependiendo de la etapa del proceso (Noorollahi et al., 2015). Además, para el agitador del sistema se emplearían 50 rpm una vez cada 2 d (Lindmark et al., 2014). Por último, se determinó el tiempo mínimo de retención

(TMR) teniendo en cuenta el promedio del rango de temperatura (1) (UPME, 2003).

$$TMR = -51,227Ln(T) + 206,72 \quad (1)$$

donde  $Ln$  es el logaritmo natural y  $T$  la temperatura grados centígrados.

### Sistemas de digestión y desarrollo experimental

Se realiza una modificación al diseño de un prototipo de sistema tipo UASB desarrollado por Lache et al. (2016) (diámetro de la tapa 60 cm, alto 60 cm, ancho 40 cm y volumen 60 L) la cual consiste en el mecanismo de agitación, que se implementó en un solo sistema con el fin de contribuir a la homogenización del sustrato y favorecer la interacción de este con la población microbiana (Lindmark et al., 2014). Se definió que el tipo de agitación sería mecánica, por lo que se usó un agitador manual tipo hélice. Adicionalmente, se modificó el diseño inicial para que cada sistema tuviera tres puntos de muestreo (ubicados a las diferentes alturas de las fases del sustrato) que permitan estudiar la variación en la composición del sustrato. De igual forma, se incorporó la utilización de bolsas herméticas como recolectores de biogás (Figura 1).

Durante 90 días se registraron los valores de pH y temperatura del sustrato contenido en cada sistema. Para analizar el comportamiento de estos parámetros con respecto al tiempo, en el día 90 se tomó nuevamente una muestra de cada sustrato para determinar relación carbono/nitrógeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales y sólidos totales, para posteriormente compararlos con los resultados obtenidos del sustrato inicial.

También se realizó una evaluación cualitativa de la actividad enzimática microbiana con el fin de determinar la presencia de microorganismos con capacidad enzimática, proteolítica, celulítica y amilolítica requeridas para degradar el material orgánico del sustrato. Para este proceso, primero se tomó una muestra de cada uno de los sistemas de digestión y se realizó la siembra en seis cultivos: tributirina (A), maíz (B), lignina (C), nutritivo (D), almidón (E) y SAB (F).

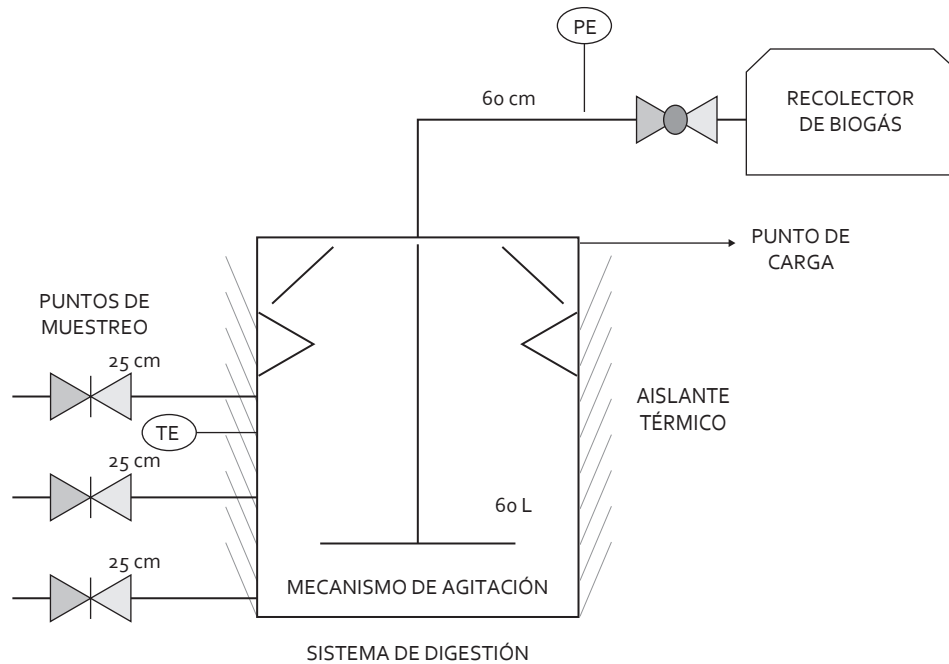


Figura 1. Sistema de digestión anaerobia con agitación.

## Métodos analíticos

La relación C/N se analizó por medio del método de Walkley-Black y Micro-Kjeldahl (Icontec, 2011); la cantidad de sólidos suspendidos totales y sólidos totales por el método gravimétrico SM 2540 D y SM 2540 B, respectivamente (IDEAM, 2002) y la demanda química de oxígeno, por el método colorimétrico por ASTMD1252/12, método B (ASTM, 2012).

Al gas producido se le realizó un análisis cromatográfico utilizando un cromatógrafo HP 5890 (Avondale, PA), una columna 13X y detector TCD (150°) que usó helio como gas de arrastre.

## Análisis estadístico

Se aplicó la distribución de F para evaluar estadísticamente el efecto de la agitación en los valores de los parámetros pH, demanda química de oxígeno y sólidos totales en cada sistema. El nivel de significancia fue 0,10 utilizando la herramienta SPSS Statistics.

## Resultados y discusión

### Biomasa evaluada y sustrato inicial

Antes de preparar el sustrato, el pH del residuo de poda fue de 6,24 y el del estiércol de bovino fue de

7,3; estos valores cercanos a la neutralidad propician la acción de los microorganismos presentes. A medida que transcurría el proceso, los valores iniciales de pH disminuirán de acuerdo con la etapa en la que se encuentre, lo que evita variaciones drásticas que puedan afectar los equilibrios químicos existentes en el medio (Fernández-Polanco y Seghezze, 2015). Por otro lado, la humedad del estiércol bovino recolectado y la del residuo de poda fue superior al 60%, lo que confirmó la conveniencia de dicho sustrato para el proceso (Secretaría de Energía, 2008), ya que favorece la etapa hidrolítica del proceso (Parra et al., 2014).

Para la formulación del sustrato inicial se consideró que el 30% del volumen total de los sistemas de digestión sería espacio vacío y que el 70% estaría ocupado por el sustrato, de acuerdo con la metodología planteada por Martina et al. (2005), es decir, 42 de 60 L. Para este volumen de sustrato se tuvo en cuenta una relación 3:1 entre agua y biomasa (mezcla de estiércol y poda) (Varnero, 2011), Cada sistema se cargó con 31,5 L de agua residual y 10,5 L de biomasa residual, de los cuales 8,5 L fueron de estiércol de bovino y 986 g de poda. Se tuvieron en cuenta los estudios realizados por Feng et al. (2017), que obtuvieron una producción de metano de 65% en el biogás producido utilizando una co-digestión de estiércol bovino con



poda al 5%. Por otra parte, según los estudios realizados por Moset et al. (2017), la adición de poda al 5% (p/p) en co-digestión con estiércol de bovino aumentó el 20% de la producción volumétrica de metano.

### Sistemas de digestión anaerobia

Para el sistema con agitación BD2A, se tomó en cuenta que la agitación mecánica de bajas revoluciones, propicia la interacción de las comunidades microbianas haciéndolas más estables y a su vez cuidando no romper la torta que conforma el sustrato (Lindmark et al., 2014), ya que una intensidad de mezcla alta (como la ejercida por una agitación por recirculación (Sánchez, 2016) podría causar rompimiento de los enlaces para la transferencia de hidrógeno de los microorganismos acetogénicos y metanogénicos (Lindmark et al., 2014). Por otro lado, un agitador mecánico permite controlar la intermitencia de mezclado, lo que contribuye a las fases de inicio del proceso y a la transformación de compuestos (Lindmark et al., 2014) y hace posible que el mezclado se realice en ambos sentidos. De igual forma, este mecanismo es propicio en procesos que operan en un rango de temperatura menor o igual al mesófilo y cuando la cantidad de sólidos totales es inferior al 10% (Ministerio de Energía de Chile, 2012) (Figura 2).

Generalmente, en los procesos de digestión anaerobia se da la formación de tres diferentes fases en el sustrato contenido: superficie flotante, sedimentos en

el fondo y sólidos suspendidos en el medio (Lindmark et al., 2014); razón por la que se establecieron tres puntos de toma de muestra en el sistema. Los puntos de muestreo se ubicaron teniendo en cuenta el volumen cargado y la altura del sistema especificada (Figura 1), es decir, el primer punto se ubicó en el 70% de los 60 L; el tercero, en los fondos de los sistemas, y el segundo, en el medio del punto 1 y 3. El biogás se recolectó en bolsas Tedlar® ajustadas a la manguera de salida, la Figura 3 muestra el montaje experimental de los dos sistemas incluyendo el sistema de aislamiento térmico con espuma de poliuretano.



Figura 3. Montaje de los sistemas de digestión. A la izquierda BD2A y derecha BD1

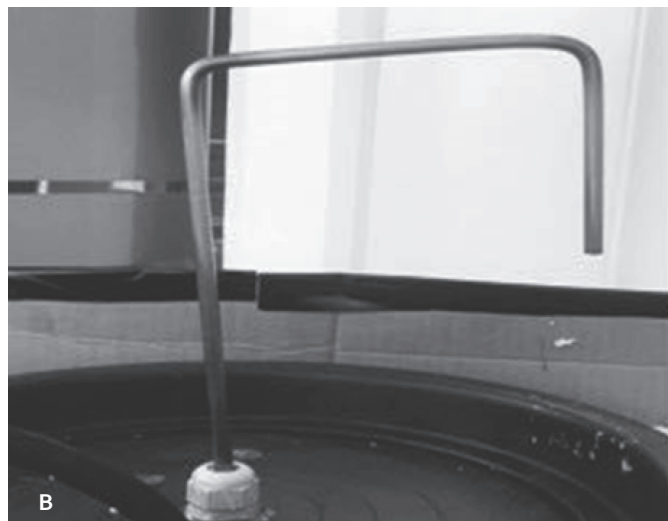
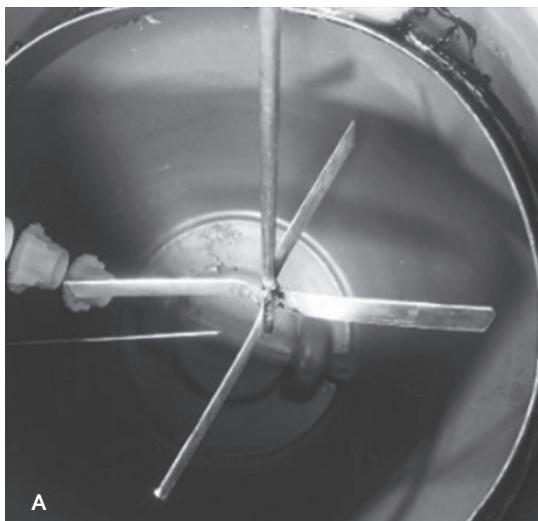


Figura 2. a) Base del agitador mecánico tipo hélice; b) Manibela para agitación

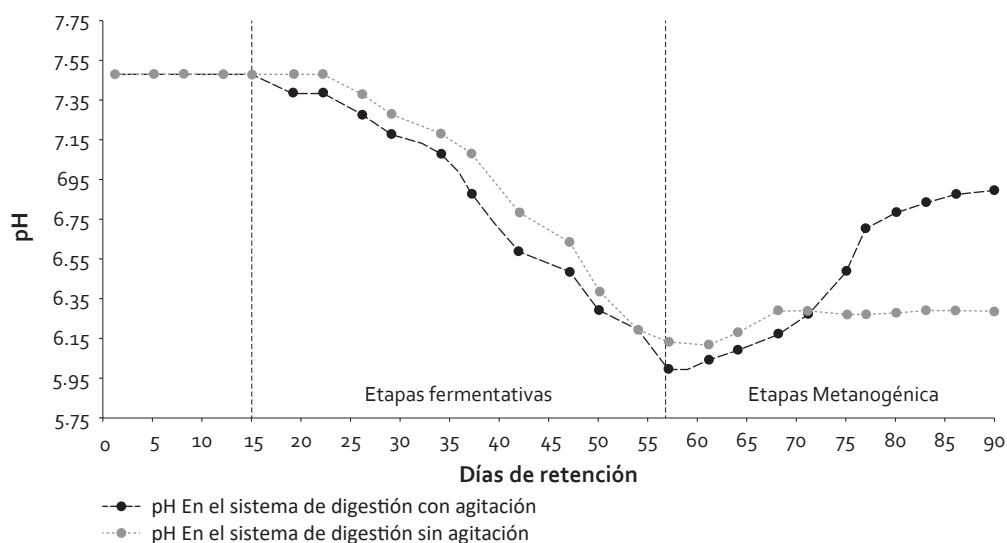


Figura 4. pH en los sistemas de digestión anaerobia con y sin agitación

## Evaluación de la actividad enzimática microbiana

Mediante una evaluación cualitativa se observó la presencia y el crecimiento microbiológico en diferentes medios de cultivos, exceptuando el cultivo de lignina, ya que la misma es degradada por medio de hongos de podredumbre blanca (Quintero et al., 2006) y no por microorganismos anaerobios.

## Comportamiento del pH a lo largo del proceso

Los valores de pH dependen principalmente de la producción de ácidos grasos volátiles en la etapa fermentativa del proceso, bajos valores de pH corresponden a un aumento de producción de ácidos grasos volátiles (Parra et al., 2014).

Se observa desde el día 15 el inicio de las etapas fermentativas en los dos sistemas por la disminución del pH (Figura 4), esto debido a que parte de los productos de la descomposición de los polímeros orgánicos en la hidrólisis son los ácidos grasos, así como en la acidogénesis y acetogénesis (Seadi et al., 2008). A partir del día 57, en el sistema con agitación BD2A, aumenta el pH como evidencia del inicio de la etapa metanogénica en el proceso donde los ácidos grasos volátiles se transforman en metano por medio de microorganismos por la ruta acetoclástica (Corrales et al., 2015), completando así todas las etapas necesarias para la producción de biogás mediante digestión anaerobia.

Por otra parte en el sistema sin agitación BD1 no aumentó el pH, evidenciando la acidificación en el sistema e inhibición de la etapa metanogénica. Esta acidificación puede ser explicada como consecuencia de la acumulación de ácidos grasos volátiles en el sustrato como lo describe Varnero (2011), a causa de la mayor producción de ácidos grasos volátiles frente al consumo de los microorganismos metanogénicos. Dicho de otro modo, por disminución en la actividad microbiana metanogénica como lo menciona Fernández-Polanco y Seghezzeo (2015).

## Propiedades del sustrato

Cada sistema presentó 4,19 g de carbono oxidable por litro de sustrato, siendo el carbono la fuente de energía para la actividad microbiana. Por otro lado, el nitrógeno orgánico encontrado fueron 1,38 g L, precursor para la formación de nuevas células (Ministerio de Energía de Chile, 2012). De acuerdo con lo anterior, la relación carbono nitrógeno osciló en 3,04, indicativo de la bajo cantidad de carbono para la actividad microbiana, promotor principal de la energía para el crecimiento en cada una de las etapas que presentarían inhibición bacteriana, además el nitrógeno libre puede acumularse en forma de amonio afectando el pH en el sistema e inhibiendo la producción de metano (UPME, 2003).

Se evaluaron los sólidos suspendidos totales, sólidos totales y demanda química de oxígeno para el

**Tabla 2.** Comparación de sólidos suspendidos totales, sólidos totales y DQO en el sustrato

Momento de la medición	Sistema de digestión con agitación (BDA2)			Sistema de digestión sin agitación (BD1)		
	Sólidos totales (g L <sup>-1</sup> )	Sólidos suspendidos totales (g L <sup>-1</sup> )	DQO (g O <sub>2</sub> /L)	Sólidos totales (g L <sup>-1</sup> )	Sólidos suspendidos totales (g L <sup>-1</sup> )	DQO (g O <sub>2</sub> /L)
Sustrato inicial	31,21	21,14	37,45	31,21	21,14	37,45
Sustrato día 90	14,98	9,140	22,041	15,73	9,075	15,82
Disminución (%)	52	56,76	29,91	49,59	57,07	49,70

sustrato inicial y los 90 días en el sistema, con el fin de comparar la variación de estos parámetros con respecto al tiempo y entre sistemas.

La disminución de sólidos en el sustrato indica su degradabilidad a lo largo del proceso (Tabla 2), presentando leves diferencias entre los sistemas a los 90 d. Los sólidos son un indicador de cuándo finaliza el proceso digestivo y la transformación del sustrato. Asimismo, la DQO se relaciona con el oxígeno necesario por parte de los microorganismos para la degradación de la materia orgánica contenida en el sustrato (Rodríguez, 2007), y es proporcional a la actividad microbiana presentando diferencias entre sistemas (Tabla 2); al día 90 el sistema sin agitación presentó menor DQO explicando la acumulación de ácidos grasos volátiles en este sistema debido a la ausencia de actividad microbiana metanogénica (Fernández-Polanco y Seghezzeo, 2015).

El análisis estadístico mostró diferencias al 0,1 de significancia para los parámetros pH, sólidos totales y DQO entre los sistemas donde la agitación mejora del proceso de digestión anaerobia.

### Análisis del biogás

En las condiciones experimentales el sistema con agitación mostró producción de biogás a partir del día 68, a 16°C de temperatura promedio y 6,18 pH; se recolectaron 11 L de biogás hasta el día 100 del proceso, cuya composición fue analizada por cromatografía, en la que se obtuvo un 21,11% de metano. Por su parte, en el sistema sin agitación, a pesar de tener las mismas condiciones y la misma cantidad y composición de sustrato, no hubo producción de biogás como consecuencia de la acidificación del sistema. La ausencia de un mecanismo de agitación generó espacio muerto y sedimentación y la falta de contacto

de la población microbiana con el sustrato y sus nutrientes (Elías, 2005).

En los estudios realizados por Feng et al. (2017) con las mismas condiciones experimentales: co-digestión con estiércol de bovino y residuo de poda y tiempo de retención de 90 d, la composición de metano en el biogás alcanzó un rango de 47 - 57% a temperatura de 55°C, 40°C más que nuestro estudio. De igual forma Moset et al. (2017) trabajaron a una temperatura de 52°C, observando un tiempo de retención superior a 26 d aproximadamente y una composición de metano entre 53-55%. Por su parte André et al. (2019), quienes trabajaron con un reactor del mismo volumen de 60 L, totalmente alimentado por sustrato seco con diferentes proporciones de poda y estiércol bovino, en uno de sus sistemas de proporción 75% de estiércol y 25% de poda y con temperatura de operación de 37°C, obtuvieron un biogás con un contenido de metano de 34,8%.

En los estudios realizados por Feng et al. (2017), Moset et al. (2017), André et al. (2019), Cong et al. (2018) y Begum et al. (2018), todos ellos contaron con un sistema de calentamiento externo, con temperaturas entre los 38 y los 53°C, lo que favoreció el proceso metabólico de las bacterias y por lo tanto que la producción de biogás comenzara en un menor tiempo que el reportado en el presente estudio así como la obtención de una mayor composición de metano en el biogás. Uno de los propósitos del presente estudio fue lograr la operación de los sistemas sin incurrir en gastos de energía térmica mediante el sistema de aislamiento térmico incorporado por Lache et al. (2016). La baja temperatura de operación de los sistemas BD1 y BD2A, propició que en el sistema sin agitación ocurriera una inhibición de la etapa metanogénica por la acumulación de

ácidos grasos volátiles como ha sido mencionado por Chynoweth et al. (2015) y Ahn et al. (2010), lo que impidió que el sistema se autorregulara, como sí ocurrió en el sistema con agitación BD2A.

## Conclusiones

A partir de la co-digestión anaerobia de un sustrato compuesto por 10,5 L de estiércol de bovino y 986 g de residuo de poda y posteriormente mezclado con 31,5 L de agua residual, en un sistema con reactor tipo UASB y con agitación mecánica manual tipo hélice, se produjo biogás con 21,11% de contenido de metano. El tipo de agitación empleada fue de baja intensidad de mezcla para no afectar a la comunidad microbiana ni sus relaciones sintróficas, lo que llegó a afectar el desarrollo del proceso y la producción de biogás. En el día 90 del proceso hubo una reducción de 52% de sólidos totales y 56,76% de sólidos suspendidos totales. En cuando a la DQO, esta solo disminuyó en un 29,97%, indicativo de actividad microbiana en la degradación de sólidos del sustrato para la producción de biogás; por su parte, en el sistema sin agitación BD1, la DQO disminuyó en un 49,7%, lo que dio lugar a la inhibición de la etapa metanogénica y causó la acumulación de ácidos grasos volátiles acidificando del sustrato.

En los dos sistemas el proceso se llevó a cabo a una temperatura psicrófila, ya que no se implementó ningún sistema de calentamiento. En consideración a la temperatura de operación de los sistemas, a temperatura ambiente de la ciudad de Bogotá y con un sistema de aislamiento térmico para evitar variación de acuerdo con el momento del día, la no producción de biogás en el sistema sin agitación BD1, permite mostrar la conveniencia de la implementación del mecanismo de agitación manual al sistema, en especial para sistemas que operen en zonas geográficas de baja temperatura y sin disponibilidad de energía para el calentamiento del reactor o para un sistema de agitación automática.

El contenido de metano de biogás producido confirma la conveniencia de emplear el residuo de poda como uno de los sustratos del proceso de co-digestión anaerobia, puesto que se trata de un residuo de alta disponibilidad en tanto urbanas como rurales, razón por la cual la investigación deberá continuar encaminada

a estudiar las relaciones de mezcla de poda con estiércol, así como en el escalamiento del sistema y el tratamiento del biogás generado para garantizar la mayor eficiencia posible en la generación de energía eléctrica.

## Bibliografía

- Ahn, H., Smith, M., Kondrad, S., White, J., 2010. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of switchgrass-animal manure mixtures. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 160(4), 965-975. DOI: 10.1007/s12010-009-8624-x
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2000. ASTM D 2216-98, método de prueba estándar para la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo y rocas en relación a su masa. Comité ASTM D-18. West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), 2012. ASTM D1252-06, standard test methods for chemical oxygen demand (dichromate oxygen demand) of water. West Conshohocken, PA.
- André, L., Zdanevitch, I., Pineau, C., Lencauchez, J., Damiano, A., Pauss, A., Ribeiro, T., 2019. Dry anaerobic co-digestion of roadside grass and cattle manure at a 60 L batch pilot scale. *Bioresour. Technol.* 289, 121737. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121737
- Begum, S., Ahuja, S., Anupou, G., Ahuja, D., Arelly, V., Juntupally, S., 2020. Operational strategy of high rate anaerobic digester with mixed organic wastes: Effect of co-digestion on biogas yield at full scale. *Environ. Technol.* 41(9), 1151-1159. DOI: 10.1080/09593330.2018.1523232
- Chynoweth, D., Bosch, G., Earle, J., Legrand, R., Liu, K., 1991. A novel process for anaerobic composting of municipal solid waste. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 28(1), 421-432. DOI: 10.1007/BF02922622
- Cong, W., Moset, V., Feng, L., Møller, H., Eriksen, J., 2018. Anaerobic co-digestion of grass and forbs—Influence of cattle manure or grass based inoculum. *Biomass Bioenerg.* 119, 90-96. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.09.009
- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., Corredor, A., 2015. Bacterias anaerobias: procesos que realizan. *Nova* 13, 55-81. DOI: 10.22490/24629448.1717
- Elías, X., 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Díaz de Santos, Madrid.
- Escribano, G., 2006. Seguridad energética: Concepto, escenarios. Documento de Trabajo 33. Real Instituto Elcano de Estudios Internacionales y Estratégicos, Madrid.
- Feng, L., Wahid, R., Ward, A., Møller, H., 2017. Anaerobic co-digestion of cattle manure and meadow grass: effect of serial configurations of continuous stirred



- tank reactors (CSTRs). *Biosyst. Eng.* 160, 1-11. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.05.002
- Fernández-Polanco, F., Seghezzi, L., 2015. Diseño de reactores upflow anaerobic sludge blanked (UASB). Cuaderno Tecnológico 15. INTI; Unión Europea, Buenos Aires.
- Fernández, J., 2007. Energía de la biomasa. Energías renovables para todos. Energías Renovables; Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Madrid.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec), 2011. NTC5167, productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Bogotá, DC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). 2002. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Resumen para responsables de políticas. Ginebra, Suiza.
- Kaparaju, P., Serrano, M., Angelidaki, I., 2010. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor. *Appl. Energ.* 87, 3779-3783. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.06.005
- Lache, A., Paez, A., Bernal, D., Quintero, D., 2016. Estabilización de temperatura en un digestor anaerobio tipo UASB alimentado con residuos bovinos y lodos. *Rev. Invest.* 9, 69-83. 10.29097/2011-639X.55
- Lindmark, J., Thorin, E., Bel, R., Dahlquist, E., 2014. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 40, 1030-1047. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.182
- Martina, P., Yank, L., Corace, J., Bucki Wasserman, B., Aeberhard, R., Ventín, A., 2005. Estudio de la producción de biogás en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor del tipo de carga única o batch. *Av. Energ. Renov. Medio Ambient.* 9, 23-27.
- Ministerio de Energía de Chile, 2012. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. Ministerio de Energía de Chile; Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Santiago.
- Moset, V., Fontaine, D., Moller, H., 2017. Co-digestion of cattle manure and grass harvested with different technologies. Effect on methane yield, digestate composition and energy balance. *Energy* 141, 451-460. DOI: 10.1016/j.energy.2017.08.068
- Noorollahi, Y., Kheirrouz, M., Farabi, H., Yousefi, H., Hajinezhad, A., 2015. Biogas production potential from livestock manure in Iran. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 50, 748-754. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.190
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015. Objetivos de desarrollo sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>; consultado: julio de 2018.
- Parra, B., Torres, P., Marmolejo, L., Cardenas, L., Vásquez, C., Torres, W., Ordóñez, J., 2014. Influencia del pH sobre la digestión anaerobia. *Rev.UDCA Actual. Divulg. Cient.* 17, 553-562. DOI: 10.31910/rudca.v17.n2.2014.421
- Posso, F., 2002. Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte II: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza* 7, 54-73.
- Quintero, J., Feijoo, G., Lema, J., 2006. Producción de enzimas ligninolíticas con hongos basidiomicetos cultivados sobre materiales lignocelulósicos. *Vitae* 13, 61-67.
- Rodríguez, C., 2007. Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. *Código* TP0086. IDEAM, Bogotá, DC.
- Rosato, M., 2018. Managing biogas plants: a practical guide. Serie Green Chemistry and Chemical Engineering. CRC Press, Boca Raton, FL. DOI: 10.1201/9781315225838
- Sánchez, J., 2016. Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional. Tesis de doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R., 2008. Biogas handbook. University of Southern Denmark, Esbjerg, Dinamarca.
- Secretaría de Energía de Argentina, 2008. Energía biomasa. Energías renovables. Coordinación de Energías Renovables, Buenos Aires.
- Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME), 2003. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-14-01. Icontec; AENE, Bogotá, DC.
- Varnero, M. (Coord.), 2011. Manual del biogás. Minenergía; PNUD; FAO; GEF, Santiago.
- Wahid, R., Feng, L., Cong, W.-F., Ward, A., Møller, H., Eriksen, J., 2018. Anaerobic mono-digestion of lucerne, grass and forbs – Influence of species and cutting frequency. *Biomass Bioenerg.* 109, 199-208. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.12.029

