

Valorización energética de estiércol equino en condiciones psicrófilas: biodigestor de bajo costo instalado en el Ejército Nacional de Colombia

Artículo largo



Yudtanduly Acuña-Monsalve^{1*} ; Juan Guillermo Jaramillo² ; Luis Alberto Ospina³ ; Daniel Molina³ ; Nikcole Daniela Claro¹ 

¹ Grupo de investigación Osiris-Bioaxis, Facultad de Ingeniería-Bioingeniería, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.

² Grupo de investigación INTERFASE, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

³ Departamento de Ciencia y Tecnología, Escuela de Armas Combinadas del Ejército. Bogotá, Colombia

*yacunam@unbosque.edu.co

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la valorización del estiércol de equino mediante digestión anaeróbica en un digestor tubular de bajo costo en condiciones psicrófilas, cuantificar los rendimientos de producción de biogás y analizar el comportamiento térmico del reactor. Los datos obtenidos durante el seguimiento indicaron un funcionamiento estable, sin riesgo de inhibición (pH= 6,6-7,5). Se produjo en promedio 0,16 Nm³ de biogás al día con un 60,5 % de CH₄, lo que supone una disponibilidad energética del EE de 325 kJ/kg tratado a través de digestión anaeróbica a escala doméstica y 20,8 °C.

Palabras clave:

Digestión anaeróbica psicrófila;
Comportamiento térmico; estiércol equino.

Energy recovery from horse manure under psychrophilic conditions: low-cost biodigester installed in the Colombian National Army

Abstract

The objective of this work was to evaluate the valorization of horse manure through anaerobic digestion in a low-cost tubular digester under psychrophilic conditions, to quantify the biogas production yields and to analyze the thermal behavior of the reactor. The data obtained during the follow-up indicated stable functioning, without risk of inhibition (pH = 6.6 - 7.5). An average of 0.16 Nm³ of biogas was produced per day with 60.5% CH₄, which means an EE energy availability of 325 kJ/kg treated through anaerobic digestion, at a domestic scale and 20.8°C.

Keywords:

Psychrophilic anaerobic digestion;
Thermal behavior;
Horse manure.

Forma de citar: Acuña Monsalve, Y., Jaramillo, J. G., Ospina, L. A., & Molina, D. (2022) Valorización energética de estiércol equino en condiciones psicrófilas: biodigestor de bajo costo instalado en el ejército nacional de Colombia. RedBioLAC, 6(2), 19-23.

Introducción

El Ejército Nacional de Colombia en busca de proteger el territorio del país y contribuir con su desarrollo, debe realizar misiones a través de una geografía variable, con ecosistemas de interés ambiental y social. Para satisfacer la demanda energética en estas zonas se deben asumir altos costos en almacenamiento y transporte de combustible. Por tal razón, la Fuerza ejecuta proyectos que impactan en el bienestar y la protección del ambiente, así como en la promoción de sistemas de autogestión energética descentralizada. En este último aspecto, en alianza con la Universidad El Bosque se realizan investigaciones sobre energías limpias, como el aprovechamiento del biogás obtenido a través de digestión anaeróbica (DA).

Particularmente, en las instalaciones de una de las escuelas de caballería del Ejército Nacional de Colombia, el Cantón Norte, se mantienen alrededor de 100 caballos, los cuales generan un volumen promedio diario de estiércol equino (EE) de 450 kg. Este se acumula en una bodega de almacenamiento, donde se estabiliza en contacto con el ambiente, lo que genera emisiones de GEI, olores y aumento de vectores de enfermedades.

Por tal razón, el tratamiento del EE es una actividad imperativa para el Cantón Norte. Por su potencial de biometanización (17,1 NL CH₄/kgSV) (Castro-Molano *et al.*, 2019) el EE resulta atractivo para ser tratado y valorizado a través de DA. Como resultado de este bioproceso se obtiene un gas combustible y un líquido con propiedades fertilizantes; el biogás y el biol son productos que permiten la gestión de energía en zonas remotas de manera sostenible y sustentable, ya que promueven la economía circular y el cuidado de los recursos aire, agua y suelo.

En la DA la temperatura es una variable importante; por debajo de los 20 °C se considera psicofilia y puede afectar la actividad de los microorganismos. Por ello, uno de los mayores retos de la DA es reducir el impacto de las bajas temperaturas ambientales sobre la población metanogénica. En este sentido, existen tres estrategias habituales: instalar un aislante entre la zanja y el digestor, instalar un invernadero y permitir un proceso de adaptación adecuado del consorcio microbiano.

En este trabajo se presenta un análisis bioquímico y térmico del proceso de adaptación de un biodigestor de bajo costo (BDG), alimentado con el EE producido en la escuela de caballería del Cantón Norte. Este análisis permite cuantificar los rendimientos del BDG, dimensionar la cantidad de energía obtenible a través de DA y determinar las consecuencias térmicas del aislamiento con el suelo junto con el invernadero, en condiciones ambientales del orden psicofílico.

Metodología

La investigación se realizó en la Escuela de Caballería del Cantón Norte en Bogotá, Colombia (4°41'09.3 "N 74°02'04.6 "W), a una altitud de 2640 m.s.n.m. y una temperatura ambiente media de 17 ± 5 °C. El BDG instalado tiene 8 m³ de volumen total y 5,6 m³ de volumen de operación. Como aislante con el suelo se usaron láminas de poliestireno expandido de 5 mm de grosor, debido a su larga durabilidad y fácil obtención. Se instaló un invernadero de polietileno traslúcido para favorecer el paso de la luz solar y disminuir el contacto entre el BDG y el aire ambiental.

El proceso de adaptación consistió en una fase batch seguida de una fase semicontinua. En la fase batch, para estimular la tasa de crecimiento de los metanógenos, se alimentó una única carga de 1300 kg de EE y agua hasta aforar el volumen operativo, y se permitió un mes de duración. En la fase semicontinua, el BDG fue alimentado con EE y agua, en relación 1:5, durante 4 meses, manteniendo un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 86 días.

El contenido y consumo de materia orgánica fue monitoreado en términos de sólidos volátiles (SV), determinado por el método termogravimétrico descrito por Standard Methods (APHA, 2005). El pH se midió con un pHmetro OHRUS. Los ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad total (AT) se cuantificaron por titrimetría (Jobling *et al.*, 2014). La calidad del biogás se evaluó a través de la concentración de metano, el contenido de biogás CH₄ se determinó por cromatografía de gases con un detector TCD en un cromatógrafo de la marca GC-Agilent 7890^a, se utilizó Argón como gas de arrastre y una columna capilar Carboxen de trama 1010 (longitud 30 m, diámetro interno diámetro 0,32 mm, capa interna de fase estacionaria de 25 µm), (Jaimes-Estévez *et al.*, 2021).

Respecto al desempeño de la DA, la producción específica de biogás (PEB ≡ Nm³ / kgSV) representa la cantidad de gas obtenido por unidad de materia orgánica removida, lo cual da información sobre el rendimiento del bioproceso; por su parte, la velocidad de producción de biogás (VPB ≡ Nm³ / m³_{op} d) se define como el volumen de gas obtenido por unidad de volumen de operación en un día, lo que da información sobre el rendimiento del reactor. Tanto el PEB como el VPB se obtuvieron mediante la instalación de un gasómetro HUMCAR.

Finalmente, el comportamiento térmico se determinó mediante la aplicación de un modelo matemático 1-D para BDGs en condiciones psicofílicas (Perrigault *et al.*, 2012). Las temperaturas del sistema de DA se registraron durante un mes y para esto se utilizaron dataloggers HOBOPendant. El sensor de temperatura ambiente (T_{amb}) se instaló a 2 m

del BDG; el de temperatura del aire del invernadero (T_{ai}) se instaló en el centro de este; el del lodo en el volumen de operación (T_L) se sumergió 40 cm en el fluido y el sensor del suelo (T_s) se instaló a 1 m de profundidad y a 1 m lineal del BDG. Los demás parámetros ambientales requeridos por el modelo fueron obtenidos de POWER Data Access Viewer (NASA, 2021).

Resultados y discusión

Durante la fase discontinua, la producción de biogás fluctuó entre 0,02-0,43 Nm³/d. Al final de la fase se alcanzó una remoción del 97 % de la materia orgánica en términos de SV. El resultado indica que el EE estabilizado puede actuar como inóculo para el proceso de DA.

Durante la fase continua se alcanzó una remoción del 96 % en SV y la producción de biogás se estabilizó en un valor medio de 0,16 Nm³/d, con una calidad del 60,5 % de metano, como puede observarse en la Figura 1. En ambas fases el pH y la concentración de AGV se mantuvieron lejos de límites inhibitorios. Los resultados del análisis bioquímico se presentan en la Tabla 1.

Respecto de los rendimientos de la DA, la PEB y la VPB fueron de 0,11 Nm³ / kgSV y 0,03 Nm³/m³_{op} d,

respectivamente. La PEB demuestra una biometanización satisfactoria del EE, ya que se alcanzó un valor competente frente a digestores con mayor tiempo de adaptación de su microbiota, como se muestra en la Tabla 2.

En 2009, Wartell trató EE sin diluir, bajo condiciones mesófilas. Como resultado, la microbiota no tuvo acceso a la materia orgánica de manera adecuada, lo que es consistente con la PEB y la calidad del biogás reportadas. Los resultados de Sanchez-Beltran *et al.* (2021) sugieren que un aumento de dilución y una disminución del TRH pueden favorecer los rendimientos.

Siguiendo el modelo expuesto en Castro *et al.* (2017), el poder calórico inferior (PCI) de un biogás con 60,5 % de CH₄ es de 21,619 kJ/m³, por lo que el presente estudio supone una gestión de 3,470 kJ/d debido al BDG. Teniendo en cuenta que en la alimentación diaria hay 10,67 kg de EE, se determina una razón de disponibilidad energética del EE de 325 kJ/kg a través de DA, a escala doméstica y 20° C. Dado que en este lugar una persona necesita entre 1,325 - 1,785 kJ/d para cocinar sus alimentos, un análisis de prefactibilidad revela que el Cantón Norte podría suministrar la energía necesaria para preparar los alimentos de 80 a 110 personas, mediante la valorización de todo su EE a través de DA, en igualdad de condiciones.

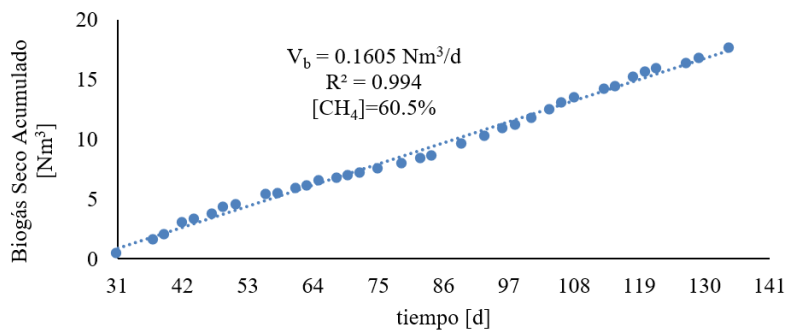


Figura 1 | Producción de Biogás seco a condiciones normales.

Tabla 1 | Resultados análisis bioquímico.

Parámetros	Unidades	Afluente	Efluente
DQO	gDQO/L	14,25±59	0,13±32
SV	gSV/kg	22,87±1,56	0,9±0,005
pH	-	6,6±0,05	7,45±0,03
AGV	mg Ac. Acético/L	920±50	480±75
AT	gCaCO ₃ /L	0,868±0,0	0,733±0,0

Tabla 2 | Comparación entre sistemas de DA escala doméstica.

Parámetro	Unidades	Este Estudio	Wartell 2009	Sanchez-Beltran et al., 2021	Castro et al., 2017
Tipo de sustrato	Estiércol Equino (EE) Estiércol Bovino (EB)	EE	EE	EE	EB
Relación sustrato: agua	L:L	1:5	Sin diluir	1:7	1:3
Temperatura del lodo	°C	20,8	25	25	25
Flujo másico de alimentación	kg/d	64	0,0004	96	204
TRH	d	87	40	45	35
V _{op}	m ³	5,60	0,015	4,06	7,1
VCO	kgSV / m ³ _{op} *d	0,26	2,80	0,71	0,70
Producción de biogás	N m ³ /d	0,16	0,004	0,50	0,85
Calidad del biogás	%CH ₄	60,5	30,8	-	65,5
PEB	N m ³ / kgSV	0,11	0,001	0,17	0,15
VPB	N m ³ / m ³ _{op} *d	0,03	0,26	0,12	0,13

En cuanto al análisis térmico, ya que el suelo es el principal sumidero de calor, en ausencia de aislantes la T_L tenderá a igualarse con la T_s (Jaramillo et al., 2021); este estudio registró temperaturas T_s y T_L de 16,3 y 20,8 °C, respectivamente, sin fluctuaciones (±0,1 °C). El aumento de 4,5 °C por encima de T_s demuestra la capacidad de colección de calor del diseño bioclimático utilizado y sugiere una disminución del TRH toda vez que el sistema se encuentra a una temperatura sensiblemente superior a la del ambiente (4,1 °C por encima de T_{amb} media).

Con respecto al flujo de calor neto específico, durante el día el lodo recibió 80,0 mW/kg y por la noche se enfrió a razón de 26,4 mW/kg. Mientras tanto, el calor transferido al suelo fue de 1,2 mW/kg de lodo, lo que demuestra el buen funcionamiento del aislante. La relación área/volumen de transferencia de calor entre el suelo y el lodo fue de 1,0 m²/m³. Debido a las propiedades de la geomembrana, la radiación solar recibida provocó un aumento en su temperatura, lo que favoreció la transferencia de calor por mecanismo convectivo y radiativo con el aire y las superficies del invernadero, y, en menor medida, con el biogás y el lodo.

Conclusiones

Los resultados indican que el EE puede actuar como inóculo y sustrato. Durante el proceso en semicontinuo, la producción de biogás se estabilizó en 0,16 Nm³/d con 60,5 % de CH₄, lo que implica una gestión de 3,470 kJ/d debido al sistema de DA y una razón de disponibilidad de 325 kJ/kgEE, como poder calórico del biogás obtenido a condiciones psicófilicas, escala doméstica. Finalmente, el diseño bioclimático fue capaz de mantener estable (±0,1 °C) la temperatura del lodo, 4,1 °C por encima de la T_{amb} media.

Lo anterior demuestra la capacidad de retención de calor del diseño bioclimático utilizado y sugiere una disminución del TRH toda vez que el sistema se encuentre a una temperatura sensiblemente superior a la del ambiente.

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto se realizó gracias a las alianzas del programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque de Bogotá, Colombia con el Departamento de Ciencia y Tecnología de la Escuela de Armas Combinadas del Ejército Nacional, así como con el apoyo del Grupo de investigación INTERFASE de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

Referencias

- Andrews, J. F. (1993). Modeling and simulation of wastewater treatment processes. *Water Science and Technology*, 28(11/12), 141–150. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0654>
- APHA. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater (21a ed.). American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
- Billing, A. E. (1987). Modelling techniques for biological systems. [M.Sc. thesis, University of Cape Town]. <https://open.uct.ac.za/handle/11427/21917>
- Billing, A. E. & Dold, P.L. (1988). Modelling techniques for biological reaction systems. 1. Mathematic description and model representation. *Water S.A.*, 14(4), 85-192.

- Castro Escalante, H., Jaimes Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>
- Castro-Molano, L. P., Parrales Ramírez, Y. A., & Escalante Hernández, H. (2019). Co-digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos. *Revista Ion*, 32(2), 29–39. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019003>
- Jaimes-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., Gómez, C., Castro, L.d.P.; Escalante Hernández, H. Psychrophilic full scale tubular digester operating over eight years: Complete performance evaluation and microbiological population. *Energies* 2021, 14, 151. <https://doi.org/10.3390/en14010151>
- Jaramillo Arango, J. G., Rodríguez Cortés, P., Jaimes Estévez, J., Castro Molano, L., & Escalante Hernández, H. (2021). Efecto del diseño bioclimático sobre el comportamiento térmico: caso de estudio dos digestores operando bajo condiciones psicofílicas. *RedBioLAC*, 5(1), 4-8.
- Jobling, B., Thai, S., Fritz, T., Esteves, S., Dinsdale, R., y Guwy, A. (2014). An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste. *Water Research*, 61, 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.020>
- Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación*. Bolivia: Cooperación Técnica Alemana-GTZ. doi:10.13140/RG.2.1.1048.6242
- NASA POWER. (2021). ‘Data Access Viewer’. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (Accessed: 30 January 2021)
- Perrigault, T., Weatherford, V., Martí-Herrero, J. & Poggio, D. (2012). Towards thermal design optimization of tubular digesters incold climates: A heat transfer model. *Bioresource Technology*, 124, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.019>
- Sánchez-Beltrán, J. M., Acevedo-Páez, J. C., & Gamboa, F. M. (2021). Analysis of the physicochemical process in the production of biogas from equine manure. *Journal of Physics: Conference Series*, 2139(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2139/1/012009>
- Wartell, B. A. (2009) *Anaerobic digestion of equine waste*. [M.Sc. thesis, New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey]. <https://doi.org/doi:10.7282/T38K798D>