

Artículo Original

El compostaje de cáscara de *Musa paradisiaca* L. para la producción de biogás y biometano como estrategia de preservación de la salud ambiental

Musa paradisiaca L. husk composting for biogas and biomethane production as a strategy for preserving environmental health

<https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.625.019>

Víctor Manuel Beteta Alvarado ¹

<https://orcid.org/0000-0001-7720-9433>

Jorge Rafael Diaz Dumont ^{2,*}

<https://orcid.org/0000-0003-0921-338X>

Luis Eduardo Oré Cierzo ²

<https://orcid.org/0000-0003-2836-2436>

Wendy Caroline Loarte Aliaga ³

<https://orcid.org/0000-0001-9489-046X>

Gianmarco Garcia Curo ²

<https://orcid.org/0000-0001-6685-3207>

Luis Pablo Diaz Tito ⁴

<https://orcid.org/0000-0001-7602-7638>

Jorge Nelson Malpartida Gutiérrez ⁵

<https://orcid.org/0000-0001-6846-0837>

Recibido: 26/07/2022

Aceptado: 12/10/2022

RESUMEN

A medida que se avanza en el siglo XXI, los sistemas de energía deben alejarse de los combustibles fósiles y aumentar la capacidad de las energías renovables si se quieren cumplir los objetivos de temperaturas máximas del Acuerdo de París. Sin embargo, debido a los desafíos en la adopción de tecnologías bajas en carbono, ciertas áreas de los sistemas energéticos globales son difíciles de controlar y descarbonar. Por otra parte, el compostaje es una de las prácticas de gestión de residuos orgánicos más importantes que se puede utilizar para lograr la sostenibilidad del suelo y del medio ambiente. El compost tiene un mínimo impacto en algunas emisiones, y puede ayudar a controlar la huella de carbono y limitar los efectos ambientales negativos de los métodos de eliminación de desechos más deficientes. La investigación tuvo por objetivo determinar la calidad de producir biogás y biometano a partir de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* L.). Metodológicamente se desarrolló una investigación aplicada, con nivel de investigación de tipo experimental. Las cáscaras de plátano se colectaron de la planta de compostaje de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, Perú. De la muestra se prepararon cinco sub muestras para la producción de biogás y cinco muestras adicionales para la producción de biometano. Los sistemas mostraron una producción de 0,067 m³ BG/Kg ST de biogás y 0,059 m³CH₄/Kg ST de biometano, que generó subproductos como el biol y biosol. Estos resultados presentaron una baja toxicidad al ser sometidos a pruebas germinativas, concluyéndose que solo el 11,5% de la cáscara introducida al biorreactor se degradó y de esta fracción solo el 2,8% se convirtió en biogás.

Palabras clave: *Musa paradisiaca*, salud ambiental, biodigestor, biol, biosol.

ABSTRACT

As progress is being made in the 21st century, energy systems must move away from fossil fuels and increase the capacity of renewable energies if you want to meet the maximum temperatures objectives of the Paris Agreement. However, due to the challenges in the adoption of low carbon technologies, certain areas of global energy systems are difficult to control and decarbure. On the other hand, composting is one of the most important organic waste management practices that can be used to achieve soil and environmental sustainability. The compost has a minimum impact on some emissions, and can help control the carbon footprint and limit the negative environmental effects of the most deficient waste removal methods. The research aimed to determine the quality of producing biogas and biomethane from the banana peel (*Musa paradisiaca* L.). Methodologically, an applied investigation was developed, with experimental research level. The banana peels were collected from the composting plant of the Provincial Municipality of Leoncio Prado, Peru. From the sample, five sub samples were prepared for the production of biogas and five additional samples for biomethane production. The systems showed a production of 0.067 m³ bg/kg ST of biogas and 0.059 m³ch₄/kg ST of biomethane, which generated by-products such as biol and biosol. These results presented a low toxicity when they were subjected to germinative evidence, concluding that only 11.5% of the shell introduced into the bioreactor was degraded and of this fraction only 2.8% became biogas.

Keywords: *Musa paradisiaca*, environmental health, biodigester, biol, biosol.

¹ Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú.

² Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Huancavelica, Perú.

³ Consultor, constructor & auditor LEOC E.I.R.L, Perú.

⁴ Universidad Privada San Juan Bautista, Lima, Perú.

⁵ Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.

*Autor de Correspondencia: jorge.diazdu@ciplima.org.pe



Introducción

A medida que se avanza en el siglo XXI, los sistemas de energía deben alejarse de los combustibles fósiles y aumentar la capacidad de las energías renovables si se quieren cumplir los objetivos de temperaturas máximas del Acuerdo de París. Sin embargo, debido a los desafíos en la adopción de tecnologías bajas en carbono, ciertas áreas de los sistemas energéticos globales son difíciles de controlar y descarbonar. Estos incluyen la industria pesada, el transporte y los sistemas de calefacción y refrigeración, que en conjunto representan una parte significativa de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (The Royal Society, 2021). El gas natural, viene, por lo tanto, a ser utilizado como combustible importante alternativo, que puede ofrecer suministro de energía a gran escala, especialmente para el espacio doméstico, necesidades de calefacción, agua caliente, generación de electricidad y aplicaciones industriales con emisiones de CO₂ mucho más bajas en comparación con petróleo y carbón. Aunque la sustitución del petróleo y el carbón por gas natural reduce las emisiones de CO₂, las emisiones fugitivas durante el procesamiento de gas natural: extracción, procesado y distribución de gas, pueden liberar CH₄. Alrededor de 39,6 millones de toneladas de CH₄ fueron emitidos en 2021 (IEA, 2022), lo que representa un 61 % de las emisiones por el uso de petróleo y gas, y un 30 % debido al sector energético. El CH₄ tiene un potencial de calentamiento global mucho más fuerte que el CO₂ y es responsable de al menos una cuarta parte del calentamiento global, por lo tanto, hay un llamado fuerte a reducir el uso de gas natural en al menos un 35 % para 2050 y un 70 % para 2100 en relación con 2019 (Speirs *et al.*, 2021). Así, una nueva fuente de energía ha sido considerada, se trata del biometano y el biogás como fuertes candidatos para sustituir el gas y reducir las emisiones de CO₂ y CH₄, y limitar el calentamiento global a 1,5 °C. La producción y el uso de biometano y biogás se han propuesto como parte de los esfuerzos de mitigación, con hasta 37 exajulios (EJ)/ año de gases a base de biomasa (Nisber *et al.*, 2020, Bakkaloglu *et al.*, 2022).

Por otra parte, el compostaje es una de las prácticas de gestión de residuos orgánicos más importantes que se puede utilizar para lograr la sostenibilidad del suelo y del medio ambiente. El compost tiene un mínimo impacto en algunas emisiones, y puede ayudar a controlar la huella de carbono y limitar los efectos ambientales negativos de los métodos de eliminación de desechos más deficientes (Flores *et al.*, 2017). Esta alternativa al aprovechamiento de los biorresiduos busca reducir las emisiones de efecto invernadero al mismo tiempo que aprovechar los bioles y biosol como fertilizantes de uso agrícola. Para ello es importante considerar una materia prima que contenga una mayor proporción de agua (Lorenzo *et al.*, 2005). También se han desarrollado diversos estudios que buscan el aprovechamiento del lodo residual formado (Longaretti *et al.*, 2019) usando materias primas como cáscara de plátano (Guevara *et al.*, 2016), cáscara de arroz (Sawazaki *et al.*, 1985), vinaza (Ariza *et al.*, 2019), residuos de ocre (Ugwu & Enweremadu, 2019), desechos de papa (Batista *et al.*, 2019), excremento de animales (Guerrero *et al.*, 2019) excremento humano (Linares *et al.*, 2017), residuos de alimentos (Burhan *et al.*, 2020), y desechos agrícolas industriales (Campos *et al.*, 2018).

El producto final de este proceso de biodegradación anaerobia es el biogás compuesto por un 50 a 30% de CO₂ y un 50 a 70% de CH₄, pero también pueden estar presentes otros gases como CO, SH₂, N₂, en concentraciones mucho menores (Lorenzo *et al.*, 2005). En muchos casos, es importante implantar un sistema de manejo de la materia prima (Parra *et al.*, 2019), para mejorar la producción, o implementar sistemas de depuración de los gases secundarios (Maldonado *et al.*, 2014), y así optimizar la pureza del metano, para su uso en diversas actividades como cocinar los alimentos, calefacción, alimentación de calderas, termas, entre otros. De este modo se puede determinar que en la mayoría de los casos la generación de biometano está alrededor de 350L/kgSV, con un 70% aproximadamente de metano (Lorenzo *et al.*, 2005). Otros estudios muestran valores diferentes atribuidos a las propiedades de la materia prima biodegradada (Leturia *et al.*, 2015), condiciones de la biodigestión (Farid *et al.*, 2019), o el tipo de inóculo empleado (Longaretti *et al.*, 2019).

De los tantos posibles desechos agrícolas que se pueden emplear en la producción de biogás y biometano, las cáscaras de plátanos podrían ser una buena alternativa. En el cultivo de esta fruta, se suele generar una variedad de residuos, como que se pueden aprovechar mediante digestión anaerobia para la generación de biogás. Entre las partes de la planta que se han usado para este fin, está: el pseudo tallo (Shiyu *et al.*, 2019), las hojas (Shakti *et al.*, 2020), las cáscaras (Chananchida *et al.*, 2014) y frutos de rechazo (Guevara *et al.*, 2016); en muchos casos se ha requerido de tratamientos previos de la biomasa, como calentamiento (Arpita *et al.*, 2019), molido (Nipon *et al.*, 2014) o tratamientos bioquímicos (Caballero *et al.*, 2010), para optimizar la degradación e incluso se han probado mejoras en la calidad de los inóculos empleados en los biodigestores (Yang *et al.*, 2019), llegando a producirse en condiciones variables valores de biogás de hasta 422,5 mL BG/gSV (Shiyu *et al.*, 2019), y metano de 181 mL CH₄/gST (Saowaluck *et al.*, 2014), 251 mL CH₄/gSV (Chananchida *et al.*, 2014), 330,6 mL CH₄/gSV (Jesuyemi *et al.*, 2017), 439 mL CH₄/gSV (Nipon *et al.*, 2014) o 232,4 mL CH₄/gSV (Chengming *et al.*, 2013).

Esta investigación tuvo por objeto determinar la capacidad de generar biogás y biometano a partir de la cáscara de plátano como una alternativa de puesta en valor de la cáscara de plátano que se dispone actualmente en la planta de compostaje de la en la ciudad de Tingo María, de la planta de compostaje de la Municipalidad distrital de Leoncio Prado, pudiéndose así, no solo reusar la biomasa residual, sino también de poder generar una energía renovable como el biometano que podría dar autonomía energética a la planta de compostaje de la municipalidad.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en la Universidad Nacional Agraria de la Selva en la ciudad de Tingo María, para lo cual se obtuvo muestras de cáscaras de plátano (*Musa paradisiaca* L.) de la planta de compostaje de la Municipalidad distrital de Leoncio Prado. La investigación fue de tipo aplicada, para determinar el potencial de reaprovechamiento de la cáscara de plátano por vía metabólica aerobia, mediante un diseño experimental aplicado, constituido por un testigo, y un tratamiento con cinco repeticiones.

El sistema de degradación anaerobia de la cáscara de plátano estuvo compuesto por 2 sistemas de degradación en 10 frascos GL 45 de 1 L de capacidad (5 repeticiones por sistema):

El sistema de producción de biogás se realizó en un frasco de vidrio en condiciones anaeróbicas, tanto para el testigo (conchas de plátano) como para las muestras bajo tratamiento (inóculo bacteriano y conchas de plátanos), conectado mediante una manguera siliconada a un segundo frasco de 1L conteniendo una solución ácida (1 L HCl 0,1 N y 4 mL de naranja de metilo al 0,1%) para garantizar un pH aproximado de 2 y evitar la disolución de gases producidos, cuya función fue la de rebose para medir por diferencia de volumen el biogás generado, ya que por expansión este líquido ácido era desplazado a un matraz aforado para medir el rebose como equivalencia al biogás producido.

Para el caso del sistema de generación de del biometano, el montaje fue similar, pero se agregó un frasco intermedio de 0,5 L entre el rebose y el reactor, el cual cumplió las veces de lavador de gases para remover el sulfuro de hidrógeno y otras impurezas generadas usando hidróxido de sodio 3 M y 5 mL de timolftaleina al 0,4%, para garantizar un pH 12.

Ambos sistemas fueron encubados en baño María a 37 °C y diariamente se medía el volumen de líquido que rebosaba de los sistemas, hasta la detención de generación de biogás y biometano.

Posterior al proceso de biodigestión anaerobia se analizó el contenido de carbono remante en la fase líquida y sólida, con el fin de calcular la eficiencia porcentual de la degradación anaerobia, para finalmente determinar el nivel de toxicidad de los biorresiduos mediante la prueba de germinación en placas.

Resultados

El proceso degradativo de la cáscara de plátano por vía anaerobia, presentó su estabilidad a un día de haber sido insertado en el biodigestor, pudiendo deberse a la variabilidad de algunos factores de biodegradación como el pH, ya que al instalarse los reactores estos presentaban un pH inicial entre 6,5 y 7,5, llegando a generar 67,62 mL BG/gSV y 59,80 mLCH₄/gSV, muy por debajo a otros estudios que lograron llegar a producir hasta 422,5 mL BG/gSV (Shiyu *et al.*, 2019) y 439 mL CH₄/gSV (Nipon *et al.*, 2014), debido a las mejores características de sus inóculos de biodigestión, condiciones de estabilidad del pH y otros parámetros de biodigestión, que llegaron hasta los 30 días de degradación anaerobia (Shiyu *et al.*, 2019).

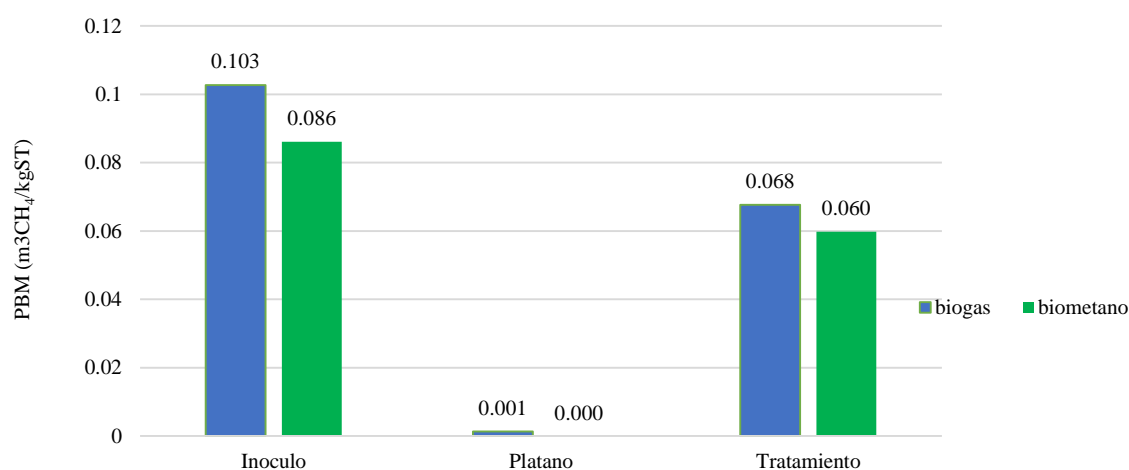


Figura 1. Potencial bioquímico de biogás y metano presentado por el inóculo, el sistema testigo y bajo tratamiento

La figura 1 muestra el potencial bioquímico para la producción de biogás y metano. Los resultados demuestran que la producción de biometano y biogás depende de las condiciones iniciales. El testigo (conchas de plátanos) no es capaz de generar metano, mientras que el inóculo (bacterias fermentativas anaeróbicas) son capaces de producir biogás o biometano. La combinación de conchas de plátano e inóculo (sistema bajo tratamiento) sí logran la producción de metano. En todos los casos, la producción de biogás fue siempre superior al biometano. El biogás contiene otros gases diferentes al metano.

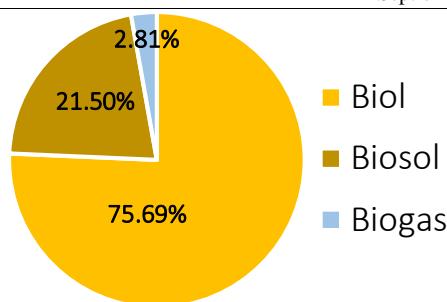


Figura 2. Distribución de carbono según el tratamiento anaeróbico de la concha de plátano

La figura 2 muestra la distribución de carbono según el tratamiento de la concha de plátano en condiciones anaeróbica. El mayor porcentaje de carbono estuvo presente en el bio (residuos de conchas de plátanos) con un 75,69%, mientras que en solución (biosol), el porcentaje de carbono presente fue de un 21,50%, mientras que en fase gaseosa (biogas), este porcentaje apenas alcanzó un 2,81 %. Esas bajas tasas de biodegradación por vía anaerobia no hacen factible el aprovechamiento directo de la cáscara de plátano para la obtención de biogás a diferencia de otros biorresiduos (Souza *et al.*, 2010).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la degradación anaerobia de la cáscara de plátano.

Parámetro	Anaerobiosis	
	Biol	Biosol
pH	7,79	8,02
Potencial de óxido reducción (mV)	-78,30	-91,40
Salinidad (%)	8,40	7,10
Conductividad (us)	4,30	3,73

La tabla 1, muestra las propiedades fisicoquímicas de la degradación anaerobia de la cáscara de plátano para los sistemas Biol y Biosol. Los resultados demuestran que, según las características obtenidas con respecto al pH, potencial de óxido-reducción, salinidad y conductividad el sistema alcanzó la maduración respectiva.

Los productos y subproductos de la degradación anaerobia no presentaron una marcada toxicidad ya que se alcanzaron índices de germinación del 75%, además de una elongación radicular superior al testigo, cumpliendo con lo establecido por NADF (2012). Bajo la degradación anaerobia se puede llegar a reaprovechar hasta un 98,61% del carbono presente en la cáscara de plátano, por lo que las pérdidas en el reaprovechamiento son menores

Discusión

Los gases de efecto invernadero tales como CO₂, CH₄, N₂O y gases fluorados son el resultado de la actividad humana, como la generación de electricidad y producción de calor (25%), agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (24%), industria (21%), transporte (14%), edificios (6%) y otras energías (10%), (Cinar *et al.*, 2022). Los vertederos públicos representan la forma más sencilla de gestionar los residuos ya que son de bajo costo y no requieren de un personal altamente calificado, sin embargo, tienen un gran impacto negativo debido a la producción de gases de vertedero, como CH₄, CO₂ y más de 200 gases distintos (causados por descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas) que tienen un gran impacto en la contaminación atmosférica, y además representan un riesgos para la salud humana (Khademi *et al.*, 2022). Además, estas emisiones son una amenaza en el agotamiento de la capa de ozono, cambio climático, acidificación, eutrofización y ecotoxicidad del ambiente. Existe, además, la posibilidad de ignición espontánea o explosión y contaminación de los drenajes superficiales durante las precipitaciones, así como del suelo y aguas subterráneas (Zupancic *et al.*, 2022).

Por otra parte, el compostaje es una de las prácticas de gestión de residuos orgánicos más importantes que se puede utilizar para lograr la sostenibilidad del suelo y del medio ambiente. El compost tiene un mínimo impacto en algunas emisiones, controlando la huella de carbono y limitando los efectos ambientales negativos de los métodos de eliminación de desechos más deficientes (Flores *et al.*, 2017). Con las actualizaciones apropiadas, el biogás y el biometano, generado por el compostaje, se puede usar en muchos sistemas con turbinas de gas y generadores, motores de combustión interna, producción de calor para uso comercial y residencial, y como combustible para el transporte a un precio muy competitivo (Kamperidou & Terzopoulou, 2021). Como se mencionó anteriormente, los dos componentes principales del biogás son el metano CH₄ y el dióxido de carbono CO₂, que van acompañados de otras impurezas como nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y amoníaco. La composición típica del volumen de biogás es 50–75 % de metano, 25–45 % de CO₂, 2–7 % de vapor de agua, menos del 2 % de amoníaco y menos del 1% de sulfuro de hidrógeno (Nachod *et al.*, 2021). Esta composición es generalmente adecuada para aplicaciones menos exigentes, como la generación de calor y electricidad (Zupancic *et al.*, 2022). Entre los productos agrícolas más utilizados en la industria del compostaje se

encuentran las frutas, vegetales, legumbres y cereales, entre los cuales se puede mencionar la cáscara de plátanos (*Musa paradisiaca L*) y conchas de otros frutos.

En ese sentido, en esta investigación se determinó la capacidad de generar biogás y biometano a partir de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca L*) como una alternativa de puesta en valor de este subproducto que se dispone actualmente en la planta de compostaje de la en la ciudad de Tingo María, de la Municipalidad distrital de Leoncio Prado, Perú. Los resultados mostraron que el proceso degradativo de estas cáscaras de plátano por vía anaerobia, presentó su estabilidad a sólo un día de haber sido insertado en el biodigestor, pudiendo deberse a la variabilidad de algunos factores de biodegradación como el pH, ya que al instalarse los reactores estos presentaban un pH inicial entre 6,5 y 7,5, llegando a generar 67,62 mL BG/gSV y 59,80 mLCH₄/gSV (Figura 1, Tabla 1), muy por debajo a otros estudios que lograron llegar a producir hasta 422,5 mL BG/gSV (Shiyu *et al.*, 2019) y 439 mL CH₄/gSV (Nipon *et al.*, 2014), debido a las mejores características de sus inóculos de biodigestión, las condiciones de estabilidad del pH y otros parámetros de biodigestión, que llegaron hasta los 30 días de degradación anaerobia (Shiyu *et al.*, 2019). Por otra parte, la figura 2 mostró la distribución de carbono según el tratamiento de la concha de plátano en condiciones anaeróbica. El mayor porcentaje de carbono estuvo presente en el bio (residuos de conchas de plátanos) con un 75,69%, mientras que en solución (biosol), el porcentaje de carbono presente fue de un 21,50%, mientras que en fase gaseosa (biogas), este porcentaje apenas alcanzó un 2,81 %. Estas bajas tasas de biodegradación por vía anaerobia no hacen factible el aprovechamiento directo de la cáscara de plátano para la obtención de biogás a diferencia de otros biorresiduos (Souza *et al.*, 2010).

La proporción de biogas y biometano producido depende de la composición del material de entrada y su grado de digestión. Este enfoque ayudará a mejorar la gestión de residuos al mismo tiempo que pretende cumplir los objetivos de la gestión sostenible de la energía. El uso de la biomasa residual para la producción de biogás genera un ciclo neutro en carbono. En este proceso, el pretratamiento, co-digestión, bio-aumentación, temperatura, tasa de carga orgánica y el diseño del reactor son algunas de las formas de aumentar la producción de biogás (Kamperidou & Terzopoulou, 2021). También se ha demostrado que los métodos de pretratamiento, como la preparación del sustrato, la solubilización mecánica en combinación con el tratamiento térmico a baja temperatura, afectan el rendimiento del biogás. En procesos de digestión anaeróbica con lodos de aguas residuales consiguiendo la aceleración de la digestión anaeróbica (Ahn & Chang, 2021). En el caso de residuos que contengan una gran cantidad de materia leñosa con un alto contenido de lignina, se requieren tiempos más largos para lograr la producción de biogás deseada.

Conflicto de intereses

No se reportó conflicto de intereses.

Agradecimientos

Agradecemos a todos los colegas y participantes del proceso investigativo.

Referencias

- Ahn, J.-Y., & Chang, SW. (2021). Effects of Sludge Concentration and Disintegration/Solubilization Pretreatment Methods on Increasing Anaerobic Biodegradation Efficiency and Biogas Production. *Sustainability*, 13, 12887. <https://doi.org/10.3390/su132212887>
- Ariza Calvo, D., Rincón-Ravelo, M., Paz Cadavid, C. A., & Gutiérrez-Montero, D. J. (2019). Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(2), 118-130. <https://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555>
- Arpita, D., & Munish Kumar, C. (2019). Enhancement of biogas production from organic fraction of municipal solid waste using hydrothermal pretreatment, *Bioresource Technology Reports*, 7, 100281, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100281>.
- Bakkaloglu, S., Cooper, J., & Hawkes, A. (2022), Methane emissions along biomethane and biogas supply chains are underestimated *One Earth* 5, 724–736. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.05.012>
- Batista, S. P., Guerra, E., Pérez, R., Juliano Tadeu, V., Gueri, M., Carvalho, G. C., Crestani, J., & Silva, I. (2019). Potential for biogas generation from sweet potato genotypes. *Revista Ambiente & Água*, 14(2), e2317. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2317>
- Burhan, S., Sallis, P., Petropoulos, E., Tabraiz, S., Ospina, C., Leary, P., Dolfing, J. & Gray, N. (2020). Stable biogas production from single-stage anaerobic digestion of food waste, *Applied Energy*, 263, 114609, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114609>
- Caballero Arzápalo, N., Ponce-Caballero, C., Cinthia, C., Gamboa-Loira, & Meyer-Pittroff, R. (2010). Biogas yield-organic load relationship model for predicting the anaerobic digestion of banana waste (musa sp.) influenced by papain and rumen, *Journal of Biotechnology*, 150, 261-262, <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.09.157>

- Campos Montiel, R. G., Razo-Rodríguez, Ó. E., Almaraz-Buendía, I., Ramírez-Bribiesca, E., Soriano-Robles, R., Salinas-Martínez, J. A., Arias-Margarito, L., & González-Muñoz, S. S. (2018). Bioconversión de desperdicios vegetales a biogás a partir de microorganismos ruminales. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(1), 149-155. <https://dx.doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.13>
- Chananchida Nathoa, U. S., & Nipon, P. (2014). Production of Hydrogen and Methane from Banana Peel by Two Phase Anaerobic Fermentation, *Energy Procedia*, 50, 702-710. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.086>
- Chengming, Z., Li, J., Liu, C., Liu, X., Wang, J., Li, S., Fan, G., & Zhang, L. (2013). Alkaline pretreatment for enhancement of biogas production from banana stem and swine manure by anaerobic codigestion, *Bioresource Technology*, 149, 353-358. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.070>
- Cinar, S. O., Nsair, A., Wieczorek, N., & Kuchta, K. (2022). Long-Term Assessment of Temperature Management in an Industrial Scale Biogas Plant. *Sustainability*, 14, 612. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1438010> (Acceso febrero 2022).
- Farid, S., Abdi, R., Najafi, B., & Faizollahzadeh Ardabili, S. (2019) The effect of thermochemical pre-treatment on biogas production efficiency from kitchen waste using a novel lab scale digester, *Renewable Energy Focus*, 28, 140-152. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.001>
- Flores, R. M., Feratero, V. J., Cobaria Soneja, S. K., Rodelas-Gonzales, R., Burog, E., Alvarez, C., & Bagus, D. A. (2017). Case Study about the Improper Waste Disposal in Barangay Mojon Tampoy; A Research Paper Presented to the Faculty of De La Salle Lipa Senior High School; De La Salle Lipa: Lipa, Philippines. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/504951739/Case-Study> (Acceso febrero 2022).
- Guerrero Toledo, F. M., Espinosa-Solares, T., Balagurusamy, N., Guerra-Ramírez, D., Huber, D. H., & Hernández-Eugenio, G. (2019). Potencial bioquímico de metano de pollinaza adicionada con propionato en condiciones mesofílicas. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 307-311. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.17>
- Guevara Bravo, C. A., Acevedo-Ruiz, J. M., & Peláez-Jaramillo, C. A. (2016). Biorrefinería a partir de banano de rechazo: un sistema integrado para la co-producción de etanol, proteína unicelular, Biogás Y Compost. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 78-86. [https://dx.doi.org/10.18684/BSAA\(14\)78-86](https://dx.doi.org/10.18684/BSAA(14)78-86)
- IEA. (2022). Global Methane Tracker 2022 (Paris: IEA). Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022> (Acceso febrero 2022).
- Jesuyemi Odedina, M., Boonya, C., Kanyarat, S., & Sumate, C. (2017) Effects of size and thermophilic pre-hydrolysis of banana peel during anaerobic digestion, and biomethanation potential of key tropical fruit wastes, *Waste Management*, 68,128-138. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.003>
- Kamperidou, V., & Terzopoulou, P. (2021). Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Waste Materials. *Sustainability*, 13, 12810. <https://doi.org/10.3390/su132212810>
- Khademi, F., Samaei, M. R., Shahsavani, A., Azizi, K., Mohammadpour, A., Derakhshan, Z., Giannakis, S., Rodriguez-Chueca, J., & Bilal, M. (2022) Investigation of the Presence Volatile Organic Compounds (BTEX) in the Ambient Air and Biogases Produced by a Shiraz Landfill in Southern Iran. *Sustainability* 14, 1040. <https://doi.org/10.3390/su14021040>
- Leturia, M., Febres, L., & Chacón, M. (2015). Caracterización de biomasa residual de la región Arequipa para la producción de biocombustibles. *Enfoque UTE*, 6(4), 42-54. <https://dx.doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n4.77>
- Linares Lujan, GA., Echeverría-Perez, C. & Cespedes-Aguilar, T. (2017). Potencial energético de la zona rural del Departamento de La Libertad (Perú) producido por biogas obtenido de excretas humanas. *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 108-117. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i4.3415>
- Longaretti, G., Meira, J. A., Sganderla, I. B., Magro, J., Márcio, A., & Mello, J. M. (2019). Estudo da atividade metanogênica específica de diferentes lodos anaeróbios. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(6), 1139-1146. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019140730>
- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I, ICIDCA. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, Ciudad de La Habana, Cuba. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 39(1), 35-48, Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006> (Acceso febrero 2022).
- Maldonado, R., Acosta, B., Osorio, J., Soto, D., & Zepieri, S. (2014). Selección y diseño de un esquema de separación CH₄-CO₂ de una corriente de biogás. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(1), 115-126. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652014000100013&lng=es&tlng=es (Acceso enero 2022).

- Nachod, B., Keller, E., Hassanein, A., & Lansing, S. (2021) Assessment of Petroleum-Based Plastic and Bioplastics Degradation Using Anaerobic Digestion. *Sustainability*, 13, 13295. <http://dx.doi.org/10.3390/su132313295>
- NADF. (2012). Norma ambiental para el distrito federal NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el distrito federal. *Gaceta oficial del distrito federal*, 69-83. Disponible en: http://data.sedema.cdmx.gob.mx/padla/images/stories/normatividaddf/nadf_020_ambt_2011.pdf (Acceso enero 2022).
- Nipon, P., Siriorn, B., & Haosagul, S. (2014). Feasibility of Biomethane Production from Banana Peel, *Energy Procedia*, 50, 782-788. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.096>
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142-159. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000200014&lng=en&tlng=es (Acceso febrero 2022).
- Saowaluck, H., Ubonrat, S., Siriorn, B., & Nipon, P. (2014). Biomethane Production from Co-digestion of Banana Peel and Waste Glycerol, *Energy Procedia*, 61, 2219-2223. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.113>
- Sawazaki, HE., Teixeira, JPF. & Moraes, RM (1985). O pH e a temperatura na produção de biogás a partir de casca de arroz. *Bragantia*, 44(2), 715-721. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051985000200019>
- Shakti, PJ., Upendra, KM & Sankalp, M (2020). Anaerobic digestion of semi-dried banana leaves in sewage water under the influence of certain additives, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.830>.
- Shiyou, P., Wen, C., Liu, Q., Chi, Y., Mi, H., Li, Z., Du, L., Huang, R., & Wei, Y. (2019). A novel hydraulic biogas digester controlling the scum formation in batch and semi-continuous tests using banana stems, *Bioresource Technology*, 286, 121372. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121372>
- Souza, O., Federizzi, M., Coelho, B., Wagner, T. M., & Wisbeck, E. (2010). Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(4), 438-443. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000400014>
- Speirs, J., Dubey, L., Balcombe, P., Tariq, N., Brandon, N., & Hawkes, A. (2021). The Best Uses of Natural Gas within Paris Climate Targets (Sustainable Gas Institute, Imperial College London). Disponible en: https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/sustainable-gas-institute/SGI_White_Paper_6-Best-Uses-of-Natural-Gas-within-Climate-Targets---October-13.pdf (Acceso enero 2022).
- The Royal Society. (2021). Low-carbon Heating and Cooling: Overcoming One of World's Most Important Net Zero Challenges. Disponible en; <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/climate-change-science-solutions/climatescience-solutions-heating-cooling.pdf> (Acceso febrero 2022).
- Ugwu, S. N., & Enweremadu, C. C. (2019). Biodegradability and kinetic studies on biomethane production from okra (*Abelmoschus esculentus*) waste. *South African Journal of Science*, 115(7-8), 1-5. <https://dx.doi.org/10.17159/sajs.2019/5595>
- Yang, Y., Lin, E., Sun, S., Chen, H., & Chow, A. (2019). Direct electricity production from subaqueous wetland sediments and banana peels using membrane-less microbial fuel cells, *Industrial Crops and Products*. 128, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.10.070>.
- Zupanccic, M., Možic, V., Može, M., Cimerman, F., & Golobic, I. (2022) Current Status and Review of Waste-to-Biogas Conversion for Selected European Countries and Worldwide. *Sustainability*, 14, 1823. <https://doi.org/10.3390/su14031823>