

Capítulo 13

Revisión del aprovechamiento de los residuos generados en la agroindustria panelera vía digestión anaeróbica

Oscar Andrés Mendieta Menjura, Diego Hernando Flórez Martínez, Eduar Yovany Antolinez Sandoval, Liliana del Pilar Castro Molano y Humberto Escalante Hernández

Resumen

La digestión anaeróbica (DA) es reconocida mundialmente como una tecnología promisoría para la gestión y valorización de residuos orgánicos, ya que cumple con los requisitos de una alternativa sostenible para la producción de biogás (bioenergía) y digerido (biofertilizante). Recientemente, se han realizado investigaciones para el tratamiento de residuos de caña de azúcar mediante dicha tecnología, lo cual podría generar beneficios económicos, sociales y ambientales para la agroindustria panelera. El objetivo de este capítulo fue revisar los avances en DA afines a las unidades productoras de panela, así como los desafíos y las pautas para promover la futura integración de esta tecnología. Como resultado, se encontró que las líneas de investigación en las cuales se deberían concentrar los esfuerzos son el diseño y la puesta en marcha de biorrefinerías, la continuidad en las pruebas a escala de laboratorio (como el potencial de biometanización) y la incorporación de metodologías de análisis (como la evaluación del ciclo de vida). Aunque la DA es una alternativa sostenible para el tratamiento de los residuos orgánicos, la tecnología aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo para la agroindustria panelera, por lo que es necesario adelantar investigación básica y aplicada.

Palabras clave: sostenibilidad, biotecnología, biomasa, economía circular, biodigestores

Introducción

La producción mundial de alimentos crece a medida que aumenta la población mundial. Al satisfacerse la demanda de alimentos, simultáneamente se eleva la generación de residuos orgánicos (agrícolas, agroindustriales, urbanos, etc.), lo cual requiere una gestión adecuada para evitar posibles cargas ambientales. Por otro lado, también crece la demanda energética, y con ella la necesidad urgente de impulsar alternativas sostenibles.

Recientemente, se han investigado varias rutas para la valorización de la biomasa residual, entre las cuales se destaca la digestión anaeróbica (DA), ya que permite procesar un amplio espectro de sustratos (materia orgánica biológica obtenida de plantas o animales) con un bajo requerimiento energético (Yellezuome et al., 2022). Entre las fuentes de biomasa se incluyen el estiércol animal, los desechos de alimentos y los residuos de cultivos agrícolas. La DA se define como un proceso de degradación microbiana en un ambiente sin oxígeno que permite la recuperación de energía por medio de la producción de biogás (mezcla gaseosa compuesta principalmente por CH_4 y CO_2) y un biofertilizante rico en minerales llamado “digerido” (materia orgánica estabilizada) (Pereda Reyes et al., 2015). El proceso consta de cuatro etapas consecutivas y cooperativas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. El éxito del proceso de la DA depende de varios parámetros fisicoquímicos, como el pH, la temperatura ambiente, el tipo de sustrato, la relación carbono/nitrógeno (C:N), el tiempo de retención de sólidos, la carga orgánica, los nutrientes disponibles y los compuestos inhibidores (Mao et al., 2015).

El biogás producido mediante DA se puede utilizar como fuente de energía renovable para producir calor o electricidad, con lo que se reduce la dependencia de otras fuentes de energía (leña o combustibles fósiles). Mientras tanto, el digerido corresponde a la fracción no degradada durante el proceso de DA. Esta tecnología reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que

conduce a una forma de energía sostenible y a un medio ambiente más limpio (Maile et al., 2016).

La integración de esta tecnología en la agroindustria panelera podría ofrecer oportunidades interesantes para contribuir a la bioeconomía circular. El procesamiento anaeróbico de desechos agroindustriales también puede agregar un valor significativo, ya que la gestión de estos desechos representa un costo importante para las agroindustrias (Koul et al., 2021). Los residuos provenientes de la caña de azúcar para la producción de panela son fuentes disponibles que podrían ser aprovechadas para obtener biogás.

El objetivo del presente estudio de revisión fue hacer una retrospectiva de trabajos anteriores, tendencias y enfoques modernos, para facilitar el desarrollo de futuros proyectos en DA para la agroindustria panelera y contribuir, consecuentemente, con información vital para la dirección de una alternativa sostenible. Este trabajo es de gran importancia, ya que brinda oportunidades para investigaciones nuevas en el campo de la bioenergía. Las pequeñas y medianas unidades productoras de panela, así como los actores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, serían los beneficiarios de este trabajo. Actualmente, en el mundo se están realizando cada día más investigaciones en el amplio espectro de la DA, lo que sugiere que su adopción como una tecnología de energía renovable está aumentando, lo cual podría contribuir a la bioeconomía circular y a la mitigación del cambio climático.

Metodología

El análisis de la tecnología de DA para los residuos orgánicos de la agroindustria panelera se basó en la literatura publicada revisada por pares (artículos científicos). Se incluyeron experiencias internacionales alineadas con el estudio, como el manejo de residuos de caña de azúcar provenientes de las industrias azucarera y del etanol, que podrían ser potencialmente introducidos en

la agroindustria panelera. Para ello, se utilizó la base de datos bibliográfica de Scopus; las palabras utilizadas en la ecuación de búsqueda fueron las siguientes: “sugarcane”, “Saccharum officinarum”, “non-centrifuga cane sugar”, “panela”, “jaggery”, “sugarcane waste”, “anaerobic digestion” y “pretreatment”.

La revisión contempló estudios a escala de laboratorio que revelaron el potencial de biometanización (Holliger et al., 2016) de los sustratos y sus respectivos pretratamientos. Por otro lado, se establecieron y clasificaron las líneas de investigación clave en DA para la agroindustria panelera en los siguientes temas: 1) temas motor, basados en corrientes principales de alto desarrollo y relevancia; 2) temas básicos y transversales, que actualmente están generando tendencia, interés y soporte; 3) temas emergentes y declinantes, que pueden cobrar relevancia e interés o que están siendo desestimados en su continuidad como línea de investigación, y 4) temas de nicho, asociados a investigaciones básicas o que han sido ampliamente trabajados pero aún no cobran la relevancia para convertirse en temas motor. Finalmente, se postularon futuras investigaciones (retos y oportunidades) relacionadas con la introducción de la tecnología de DA en la agroindustria panelera.

Resultados y discusión

Inicialmente, se presenta la revisión de los principales residuos generados en la agroindustria panelera que han sido gestionados a través de DA en monodigestión. Luego, se revelan estudios enfocados en codigestión anaeróbica, es decir, el tratamiento simultáneo de varios residuos de caña de azúcar. Posteriormente, se establecen y clasifican las líneas de investigación para la tecnología de DA en la agroindustria panelera, y se postulan desafíos y pautas para su implementación a gran escala.

Residuos agrícolas de cosecha

En la agroindustria panelera se generan diversos residuos orgánicos, tanto en el cultivo como en el proceso de transformación.

En la zona de corte de los tallos, cuando la caña alcanza su estado de madurez, se producen los residuos agrícolas de cosecha (RAC), comprendidos por hojas verdes y secas, cogollos y cañas no recuperables. Los RAC constituyen un recurso natural abundante, económico y renovable, y en ellos se almacena alrededor de un tercio de la energía primaria total de la caña de azúcar (Leal et al., 2013).

Los RAC muestran una resistencia a ser hidrolizados, debido a su naturaleza lignocelulósica, hidrofóbica y recalcitrante (Janke et al., 2016). Por tanto, el acceso de los microorganismos y enzimas durante el proceso de DA es limitado. Para contrarrestar estos efectos inhibitorios, se han utilizado diferentes tipos de pretratamientos (por ejemplo, el físico, el químico, el biológico, etc.), como opciones para mejorar el proceso de DA, al aumentar el área de superficie accesible y modificar la estructura cristalina o de la lignina (Hendriks & Zeeman, 2009). En la literatura se reportan los siguientes pretratamientos para los RAC: el tratamiento físico, mediante la reducción del tamaño de partícula (Mendieta et al., 2020b); el ácido (Sindhu et al., 2011); el alcalino (Janke et al., 2017; Sindhu et al., 2014); el ácido con surfactante (Sindhu et al., 2012); el biológico (Kumari & Das, 2016); el ultrasónico asistido por surfactante (Sindhu et al., 2013), y los tratamientos secuenciales (Raghavi et al., 2016). Aunque se cuenta con un amplio abanico de posibilidades de pretratamiento para los RAC, es necesario identificar una alternativa técnica y económicamente viable para la agroindustria panelera. Una opción atractiva es la reducción del tamaño de partícula.

Los RAC presentan un potencial de biometanización (PBM) de 0,261 Nm³ de CH₄/kg de sólidos volátiles (sv), al reducir su tamaño de partícula a 2 mm, y son un sustrato de capacidad amortiguadora y de biodegradabilidad adecuadas para el proceso de DA (Mendieta et al., 2020b).

Cachaza

El proceso de producción de panela involucra una etapa de clarificación del jugo, en la cual se obtiene un residuo agroindustrial

llamado “cachaza”: un líquido coloidal de color oscuro. En algunas unidades productoras de panela se utiliza la cachaza como un subproducto para la alimentación animal. Sin embargo, en otras unidades de producción no se cuenta con buenas prácticas de manejo, por lo cual este residuo se convierte en un riesgo ambiental para las fuentes hídricas y el suelo. Las características de la cachaza, como su alta humedad y su elevada concentración de materia orgánica, pueden contribuir al proceso de DA.

En la literatura se informa que la cachaza tiene un PBM de 0,227 Nm³ de CH₄/kg de sv empleando un pretratamiento de dilución al 12,5 % v/v (Mendieta et al., 2020c). Este pretratamiento se empleó debido a que la cachaza presentó una naturaleza ácida. Otra alternativa por explorar consiste en regular el pH de la cachaza a través de un pretratamiento alcalino o su combinación con otro sustrato que permita regular la acidez, como el estiércol bovino.

La cachaza es un residuo característico de la agroindustria panelera y poco ha sido explorado su uso en la tecnología de DA. No obstante, su alto contenido de azúcares rápidamente degradables (García et al., 2007) y su baja concentración de fibra la convierten en un sustrato atractivo para el proceso de DA.

Bagazo

En la agroindustria panelera se generan otros residuos orgánicos. Durante la molienda de la caña de azúcar se obtiene bagazo al extraer el jugo. Este se utiliza principalmente para producir energía térmica para el proceso. Sin embargo, por lo general, los hornos tradicionales presentan bajas eficiencias, de alrededor del 29 % (Sardeshpande et al., 2010). Además, la escasez de bagazo es muy común en estos hornos debido a la baja eficiencia en la utilización del calor (Anwar, 2010). Por tanto, el bagazo obtenido en la molienda es gastado completamente para la generación de energía térmica.

No obstante, dependiendo de la tecnología utilizada en el horno de producción de panela (Rodríguez et al., 2018), es posible que

se generen excedentes de bagazo y que el residuo se encuentre disponible para la generación de biogás. En este caso, el PBM del bagazo oscila alrededor de $0,187 \text{ Nm}^3$ de CH_4/kg de sv, al reducir el tamaño de partícula a 2 mm (Paulose & Kaparaju, 2021). El bagazo, al ser pretratado hidrotérmicamente a $180 \text{ }^\circ\text{C}$ y un 8,5 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, alcanza un PBM de $0,23 \text{ Nm}^3$ de CH_4/kg de sv (Mustafa et al., 2018).

Codigestión anaeróbica

En las unidades productoras de panela se dispone de varios residuos orgánicos, y una opción de gestión y valorización de estos es el tratamiento simultáneo de las biomásas por codigestión anaeróbica (CoDA). La CoDA de varios sustratos puede aumentar la producción de biogás en comparación con los sustratos individuales (Kangle et al., 2012); sin embargo, tiene la desventaja de que en gran medida aún se desconoce la proporción exacta de mezcla de los sustratos para lograr un proceso óptimo, ya que depende del tipo de biomasa y de las condiciones reales de operación disponibles (Adekunle & Okolie, 2015).

En industrias como la del azúcar y el bioetanol a partir de caña de azúcar, se generan residuos como el bagazo, la vinaza y la torta de filtración. Estos residuos presentan una elevada concentración de materia orgánica, representada por un contenido de sólidos volátiles superior al 70 %, y un PBM entre $0,199$ y $0,341 \text{ Nm}^3$ de CH_4/kg de sv (Janke et al., 2015). Por otro lado, el rendimiento de la producción de biogás de dichos residuos se ha mejorado a través de la CoDA. López González et al. (2017) investigaron la CoDA de mezclas compuestas de vinaza y torta de filtración en diferentes proporciones de mezcla: 0:1, 1:0, 1:3, 3:1 y 1:1. Así, se demostró que la CoDA de estos sustratos aumenta el PBM hasta $0,246 \text{ Nm}^3$ de CH_4/kg de demanda química de oxígeno (DQO), un 13 % más que la torta de filtración individualmente. Talha et al. (2016) determinaron que la CoDA de la torta de filtración con bagazo produce más metano que la monodigestión de la torta de filtración. Incluso, la composición del digerido de la CoDA presentó

un mejor equilibrio de nutrientes (relación C:N: 24,70) cuando la relación entre la torta de filtración y el bagazo fue de 1:3, en comparación con la torta de filtración como sustrato único (relación C:N: 9,68). Cárdenas-Cleves et al. (2018) realizaron la CoDA de la torta de filtración con residuos de alimentos (4:1), y obtuvieron incrementos en el rendimiento de metano del 12 y el 22 % en comparación con las monodigestiones, respectivamente.

Al combinar la cachaza generada en la agroindustria panelera con los RAC en una proporción de 25:75, se obtuvo un PBM de 0,276 Nm³ de CH₄/kg de sv (Mendieta et al., 2020b). Por tanto, se observa un efecto sinérgico para la mezcla, es decir, un rendimiento acumulado de metano superior a las monodigestiones de ambos sustratos (30,2 % para la cachaza y 5,9 % para los RAC). Esto demuestra que la CoDA de los RAC y la cachaza es una opción eficiente para la producción de biogás.

Por otro lado, en la agroindustria panelera se generan aguas residuales durante el lavado de equipos y utensilios. Al utilizar dichas aguas para la dilución de los sustratos (RAC y cachaza), se obtuvo una producción de biogás de 0,132 m³/kg de sv en un biodigestor tubular a escala de banco (Mendieta et al., 2020a).

Clasificación de las líneas de investigación

En la figura 13.1 se muestra el mapa temático conceptual de las líneas de investigación clave en DA para la agroindustria panelera. La clasificación se basó en las variables de centralidad y densidad: nivel de relevancia y nivel de desarrollo del tema de investigación. Los resultados obtenidos son los siguientes:

1. Temas motor (cuadrante superior derecho): se destacan el diseño y la puesta en marcha de biorrefinerías, la recuperación de bioenergía derivada de residuos, la mejora del rendimiento de metano y la cogeneración de energía.
2. Temas básicos (cuadrante inferior derecho): potencial de biometanización (a escala de laboratorio), procesos de codigestión,

Desafíos y pautas

Aunque la DA parece ser una tecnología adecuada y prometedora para la agroindustria panelera, existen algunos obstáculos que dificultan su implementación a gran escala y que son temas para futuras investigaciones. A continuación, se detallan algunas barreras y se proyectan directrices para promover la integración de esta tecnología:

- Enfoques empíricos de la tecnología de DA: la investigación en este campo es reciente para la agroindustria panelera, por lo que aún falta comprender a profundidad los aspectos fundamentales para la gestión de sus residuos mediante dicha tecnología. Existen algunas iniciativas actuales que provienen de otras industrias (azucarera y de bioetanol) y que se han extrapolado a la producción de panela. Sin embargo, esta transferencia podría conducir a percepciones erradas de la tecnología por parte de los productores de panela si no encuentran los resultados esperados, y, en consecuencia, se podría afectar su adopción. Por tanto, es necesario abrir la “caja negra” referente a la disponibilidad y utilización de los sustratos y consorcios microbianos, los mecanismos y la cinética de formación de los productos y los fenómenos de transferencia de masa e hidrodinámica que ocurren en los reactores.
- Escala de laboratorio: la mayoría de los estudios reportados en la literatura son imprescindiblemente a escala de laboratorio. Sin embargo, se requiere investigación aplicada a gran escala, que conduzca a recomendaciones directas para los usuarios. Dado que a partir de la caña de azúcar se generan diversos residuos, y en el mismo sistema de producción de panela es posible obtener otros tipos de residuos orgánicos (como estiércol animal, aguas residuales, desechos de alimentos, residuos de poda, entre otros), es importante realizar más investigación en codigestión a partir de los diversos tipos de sustrato para la optimización en la producción de biogás de calidad (con un contenido elevado de metano) y un digerido rico en nutrientes. La CoDA necesita una gestión minuciosa, ya que los parámetros y ajustes operativos

establecidos habitualmente no son prácticos ni generales para todos los residuos orgánicos biodegradables.

- **Uso de los productos:** las investigaciones publicadas recientemente indican que la DA tiene el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales, al producir energía mediante la sustitución de combustibles fósiles o leña por biometano (Moraes et al., 2017). Además, el digerido presenta una baja carga de patógenos y contiene nutrientes que están fácilmente disponibles para ser absorbidos por los cultivos en forma de nitratos, fosfatos y otros compuestos orgánicos (Auer et al., 2017); el uso de digerido como fertilizante puede reducir las emisiones de N_2O al reemplazar alternativas inorgánicas cuya producción requiere grandes cantidades de energía (Zhu et al., 2019). Por tanto, es necesario identificar las características de los productos obtenidos vía DA y las opciones de aplicación en el mismo sistema productivo, para contribuir a la bioeconomía circular de la agroindustria panelera.
- **Modelos productivos:** la integración de la tecnología de DA en la agroindustria panelera depende de varios factores, entre ellos la materia prima, la configuración del digestor para la obtención del biogás y el digerido, y sus posibles usos. La idoneidad de la materia prima para el proceso de DA se rige por la disponibilidad, el costo, los requisitos de pretratamiento/suplementación, los rendimientos de calidad del biogás y el digerido, y los beneficios ambientales, económicos y sociales. Además, existen otros factores logísticos que deben ser considerados, como la recolección, transporte y almacenamiento de los sustratos. Aún queda mucho por investigar y desarrollar con respecto al modelado matemático y la aplicación de herramientas de predicción y optimización de la tecnología de DA; estas herramientas deben incluir desde la consecución de la materia prima hasta la distribución y aplicación de los productos. Los modelos desarrollados a la fecha no tienen en cuenta la variación geográfica (ambiental) y estacional (temporal) de los sustratos, lo cual representa una oportunidad para investigar en esta dirección. Es necesario

explorar en profundidad la hibridación del biogás con fuentes de energía convencionales y no convencionales. El modelado y las simulaciones se pueden acoplar a la optimización de diferentes objetivos específicos, como maximizar la producción de biogás y minimizar tanto el costo de energía como los perjuicios ambientales, entre muchos otros.

Conclusiones

En este estudio se revisó el estado del arte y se analizaron las perspectivas futuras en el campo de la DA para la gestión y valorización de los residuos agroindustriales del proceso de producción de panela. A pesar de que la DA es una alternativa sostenible para el tratamiento anaeróbico de los residuos orgánicos, la tecnología aún se encuentra en sus primeras etapas de desarrollo y se necesita mucha más investigación básica y aplicada. Algunos obstáculos y cuellos de botella fueron identificados y deben ser superados para fomentar la adopción de la DA por parte de los productores de panela, como realizar estudios a gran escala en biodigestores, definir la estrategia para el uso del biogás y el biofertilizante, y desarrollar un modelo productivo que integre dicha tecnología de gestión de residuos. En consecuencia, para lograr una aplicación práctica y amplia del proceso de DA en la agroindustria panelera, es necesario contar con incentivos combinados por parte de las agencias gubernamentales y ambientales, así como con el apoyo de la comunidad científica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) (Convocatoria 757 de 2016), así como a AGROSAVIA y a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por el desarrollo de este estudio.

Referencias

- Adekunle, K. F., & Okolie, J. A. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6(3), 205-212. <http://dx.doi.org/10.4236/abb.2015.63020>
- Anwar, S. I. (2010). Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans. *Energy Conversion and Management*, 51(2), 360-364. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.033>
- Auer, A., Vande Burgt, N. H., Abram, F., Barry, G., Fenton, O., Markey, B. K., Nolan, S., Richards, K., Bolton, D., De Waal, T., Gordon, S. V., O'Flaherty, V., Whyte, P., & Zintl, A. (2017). Agricultural anaerobic digestion power plants in Ireland and Germany: Policy and practice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(3), 719-723. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8005>
- Cárdenas-Cleves, L. M., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2018). Anaerobic codigestion of sugarcane press mud with food waste: Effects on hydrolysis stage, methane yield, and synergistic effects. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018, artículo 9351848. <https://doi.org/10.1155/2018/9351848>
- García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano Latorre, A., Santana, N. J., & Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13454>
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100(1), 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science & Technology*, 74(11), 2.515-2.522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Janke, L., Leite, A., Batista, K., Weinrich, S., Sträuber, H., Nikolausz, M., Nelles, M., & Stinner, W. (2016). Optimization of hydrolysis and volatile fatty acids production from sugarcane filter cake: Effects of urea supplementation and sodium hydroxide pretreatment.

- Bioresource Technology*, 199, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.117>
- Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., & Stinner, W. (2015). Biogas production from sugarcane waste: Assessment on kinetic challenges for process designing. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(9), 20.685-20.703. <https://doi.org/10.3390/ijms160920685>
- Janke, L., Weinrich, S., Leite, A., Terzariol, F. K., Nikolausz, M., Nelles, M., & Stinner, W. (2017). Improving anaerobic digestion of sugarcane straw for methane production: Combined benefits of mechanical and sodium hydroxide pretreatment for process designing. *Energy Conversion and Management*, 141, 378-389. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.083>
- Kangle, K. M., Kore, S. V., Kore, V. S., & Kulkarni, G. S. (2012). Recent trends in anaerobic codigestion: A review. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2(4), 210-219. https://www.researchgate.net/publication/236002577_Recent_Trends_in_Anaerobic_Codigestion_A_Review
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2021). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, 206, artículo 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Kumari, S., & Das, D. (2016). Biologically pretreated sugarcane top as a potential raw material for the enhancement of gaseous energy recovery by two stage biohythane process. *Bioresource Technology*, 218, 1.090-1.097. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.070>
- Leal, M. R. L. V., Galdos, M. V., Scarpore, F. V., Seabra, J. E. A., Walter, A., & Oliveira, C. O. F. (2013). Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy*, 53, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.007>
- López González, L. M., Pereda Reyes, I., & Romero Romero, O. (2017). Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield. *Waste Management*, 68, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.016>
- Maile, I., Muzenda, E., & Mbohwa, C. (2016, 26-28 de octubre). *Optimization of biogas production through anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: A review* [presentación en conferencia]. The 7th International Conference on Biology, Environment and Chemistry, San Francisco, Estados Unidos.

- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mendieta, O., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020a). Management and valorization of waste from a non-centrifugal cane sugar mill via anaerobic co-digestion: Technical and economic potential. *Bioresource Technology*, 316, artículo 123962. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123962>
- Mendieta, O., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020b). Synergistic effect of sugarcane scum as an accelerant co-substrate on anaerobic co-digestion with agricultural crop residues from non-centrifugal cane sugar agribusiness sector. *Bioresource Technology*, 303, artículo 122957. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122957>
- Mendieta, O., Madrigal, G., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020c). Sugarcane scum as a novel substrate for rapid biogas production from the non-centrifugal cane sugar agribusiness sector in developing countries. *Bioresource Technology*, 297, artículo 122364. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122364>
- Moraes, B. S., Petersen, S. O., Zaiat, M., Sommer, S. G., & Triolo, J. M. (2017). Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. *Applied Energy*, 189, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.009>
- Mustafa, A. M., Li, H., Radwan, A. A., Sheng, K., & Chen, X. (2018). Effect of hydrothermal and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pretreatments on anaerobic digestion of sugarcane bagasse for biogas production. *Bioresource Technology*, 259, 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.028>
- Paulose, P., & Kaparaju, P. (2021). Anaerobic mono-digestion of sugarcane trash and bagasse with and without pretreatment. *Industrial Crops and Products*, 170, artículo 113712. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113712>
- Pereda Reyes, I., Pagés Díaz, J., & Sárvári Horváth, I. (2015). Anaerobic biodegradation of solid substrates from agroindustrial activities — Slaughterhouse wastes and agrowastes. En R. Chamy, & F. Rosenkranz (Eds.), *Biodegradation and bioremediation of polluted systems: New advances and technologies*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/60907>

- Raghavi, S., Sindhu, R., Binod, P., Gnansounou, E., & Pandey, A. (2016). Development of a novel sequential pretreatment strategy for the production of bioethanol from sugarcane trash. *Bioresource Technology*, 199, 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.062>
- Rodríguez, J., Velásquez, F., Espitia, J., Escobar, S., & Mendieta, O. (2018). Thermal performance evaluation of production technologies for non-centrifuged sugar for improvement in energy utilization. *Energy*, 152, 858-865. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.127>
- Sardeshpande, V. R., Shendage, D. J., & Pillai, I. R. (2010). Thermal performance evaluation of a four pan jaggery processing furnace for improvement in energy utilization. *Energy*, 35(2), 4.740-4.747. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.018>
- Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Janu, K. U., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2011). Dilute acid pretreatment and enzymatic saccharification of sugarcane tops for bioethanol production. *Bioresource Technology*, 102(23), 10.915-10.921. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.066>
- Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Preeti, V. E., Sandhya, S. V., Vani, S., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2012). Surfactant-assisted acid pretreatment of sugarcane tops for bioethanol production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167(6), 1.513-1.526. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9557-3>
- Sindhu, R., Kuttiraja, M., Binod, P., Sukumaran, R. K., & Pandey, A. (2014). Physicochemical characterization of alkali pretreated sugarcane tops and optimization of enzymatic saccharification using response surface methodology. *Renewable Energy*, 62, 362-368. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.041>
- Sindhu, R., Kuttiraja, M., Preeti, V. E., Vani, S., Sukumaran, R. K., & Binod, P. (2013). A novel surfactant-assisted ultrasound pretreatment of sugarcane tops for improved enzymatic release of sugars. *Bioresource Technology*, 135, 67-72. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.050>
- Talha, Z., Ding, W., Mehryar, E., Hassan, M., & Bi, J. (2016). Alkaline pretreatment of sugarcane bagasse and filter mud codigested to improve biomethane production. *BioMed Research International*, 2016, artículo 8650597. <https://doi.org/10.1155/2016/8650597>
- Yellezuome, D., Zhu, X., Wang, Z., & Liu, R. (2022). Mitigation of ammonia inhibition in anaerobic digestion of nitrogen-rich substrates for biogas production by ammonia stripping: A review. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 157, artículo 112043. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112043>

Zhu, T., Curtis, J., & Clancy, M. (2019). Promoting agricultural biogas and biomethane production: Lessons from cross-country studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, artículo 109332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109332>

