

Digestión Anaeróbica: Un Enfoque Circular para la Gestión de Residuos Orgánicos

M.I. Daniel Alfredo Ortiz Torres^a, Dr. Ricardo López Zavala^{a*}, Dra. Mydory Oyuky Nakasima López^{b*}, Ing. José Raúl Sánchez Ramírez^a, Dra. Karla Frida Madrigal Estrada^b, Dra. Sukey Sayonara Nakasima López^b

^a Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, daniel.alfredo.ortiz.torres@uabc.edu.mx; rlopez99@uabc.edu.mx; raul.sanchez94@uabc.edu.mx, Mexicali, Baja California, México.

^b Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, nakasima.mydory@uabc.edu.mx; kmadrigal@uabc.edu.mx; snakasima@uabc.edu.mx; Tijuana, Baja California, México.

Resumen

La economía circular busca transformar el modelo lineal de producción y consumo mediante estrategias como la reducción de residuos, la reutilización de recursos y la valorización de desechos. En este contexto, la digestión anaeróbica (DA) se presenta como una alternativa prometedora para la gestión de residuos orgánicos, al transformarlos en biogás y biofertilizantes, evitando su disposición en rellenos sanitarios. Este proceso no solo reduce la contaminación ambiental, sino que también reintegra estos residuos a la economía, alineándose con los principios de sostenibilidad y gestión integral de recursos.

Estudios han evidenciado el gran potencial energético del biogás. Por ejemplo, la quema de 0.025 m³ de biogás genera 2.54 kcal de energía térmica por cada 1 % de metano (CH₄), lo que equivale a un rendimiento energético de aproximadamente 5,400 kcal/m³ con un contenido del 60 % de metano. En Brasil, la generación de biogás podría alcanzar entre 4.5 y 6.9 GW de potencia eléctrica, reduciendo las emisiones de CO₂ en un 4.93 % anual y abasteciendo a aproximadamente 180,000 camiones.

Sin embargo, la implementación de la DA enfrenta desafíos importantes, como la falta de incentivos gubernamentales, infraestructura deficiente y educación ambiental limitada. Además, la separación de residuos aún no es una práctica común en muchos países, lo que reduce la eficiencia del proceso.

A pesar de estas limitaciones, la DA contribuye significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 7: Energía asequible y no contaminante, el ODS 12: Producción y consumo responsables y el ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. Para consolidar la economía circular, es esencial promover políticas públicas, invertir en infraestructura e impulsar la educación ambiental.

Palabras clave— Biogás, Biomasa, Economía Circular, Digestión anaeróbica y Residuos orgánicos.

Abstract

The circular economy seeks to transform the linear model of production and consumption through strategies such as waste reduction, reuse of resources and waste valorization. In this context, anaerobic digestion (AD) is presented as a promising alternative for the management of organic waste, transforming it into biogas and biofertilizers, avoiding its

disposal in landfills. This process not only reduces environmental pollution, but also reintegrates these wastes into the economy, in line with the principles of sustainability and integrated resource management.

Studies have shown the great energy potential of biogas. For example, the burning of 0.025 m³ of biogas generates 2.54 kcal of thermal energy per 1 % methane (CH₄), equivalent to an energy yield of approximately 5,400 kcal/m³ with a 60 % methane content. In Brazil, biogas generation could reach between 4.5 and 6.9 GW of electric power, reducing CO₂ emissions by 4.93 % annually and supplying approximately 180,000 trucks.

However, the implementation of AD faces significant challenges, such as lack of government incentives, poor infrastructure and limited environmental education. In addition, waste separation is still not a common practice in many countries, which reduces the efficiency of the process. Despite these limitations, AD contributes significantly to the Sustainable Development Goals (SDGs), such as SDG 7: Affordable and Clean Energy, SDG 12: Responsible Production and Consumption and SDG 15: Life of Terrestrial Ecosystems. To consolidate the circular economy, it is essential to promote public policies, invest in infrastructure and promote environmental education.

Keywords— Biogas, Biomass, Circular Economy, Anaerobic Digestion and Organic Waste.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la tecnología ha tomado un papel importante en la vida cotidiana, estando presente desde que empieza el día hasta que finaliza. Sin embargo, es tan común ver las cosas a nuestro alrededor sin preguntarnos a dónde terminan. El consumo actual de bienes y servicios genera, de manera inevitable, algún tipo de residuo, al cual, en muchas ocasiones, no se le da un seguimiento adecuado para su correcta disposición. Este ciclo se repite constantemente, ya que, una vez satisfecha una necesidad o un lujo, se crea una nueva necesidad de consumo que contribuye al aumento de esta problemática [1].

Lo anteriormente mencionado representa un punto de inflexión en la gestión de residuos, considerando que, a nivel mundial, se estima que el 70 % de estos terminan en vertederos. Estos sitios son focos de contaminación, ya que afectan el subsuelo debido a la filtración de lixiviados, generan malos olores y provocan diversos problemas ambientales [2].

Dichas problemáticas han adquirido una relevancia significativa en la actualidad, lo que ha provocado la búsqueda de soluciones sostenibles que rompan con el esquema actual de economía lineal. Este modelo se basa en la extracción de recursos naturales para la producción de bienes, los cuales son consumidos y, posteriormente, desechados. En contraste, se propone un modelo de economía circular, en el que, después de consumir un producto, este pueda

reincorporarse a las cadenas productivas como materia prima secundaria mediante estrategias como la reparación, reutilización reciclaje, simbiosis industrial, entre otras. De este modo, se crea un ciclo que minimiza la generación de desechos y promueve un uso más eficiente de los recursos [3].

La digestión anaeróbica (DA) se posiciona como una de las mejores alternativas para alcanzar un modelo de economía circular en la gestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU). Este proceso se lleva a cabo en contenedores herméticos, conocidos como “biodigestores”, en ausencia de oxígeno. Durante la DA, la materia orgánica se descompone, generando como producto final un biocombustible gaseoso denominado biogás. Dicho biogás está compuesto principalmente por aproximadamente un 70 % de metano (CH_4) y un 30 % de dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, el componente responsable de la generación de energía eléctrica y/o térmica es el metano (CH_4), el cual, cuando se obtiene por medios biológicos, se conoce como biometano [4].

Por lo anterior, el proceso de digestión anaeróbica (DA) está directamente relacionado con el concepto de economía circular, ya que aquello que comúnmente se considera “basura” se transforma en una materia prima capaz de generar bienes o servicios que pueden reincorporarse al sector comercial. Este proceso permite la gestión de residuos mediante su conversión en productos de valor agregado, como el biofertilizante y la energía (eléctrica o térmica), además de su posible uso como biocombustible para vehículos [5].

En línea con lo anteriormente mencionado, este tipo de propuestas están directamente relacionadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En primer lugar, abarca el ODS 6: “Agua limpia y saneamiento”, debido al tratamiento de aguas que se lleva a cabo en este tipo de procesos. Asimismo, contribuye al ODS 12: “Producción y consumo responsables”, al reducir la generación de residuos; al ODS 14: “Vida submarina” y al ODS 15: “Vida de ecosistemas terrestres”, ya que este proceso minimiza la contaminación y la generación de desechos. Además, con la producción de biogás y su aprovechamiento para la generación de energía, también impacta en el ODS 7: “Energía asequible y no contaminante”. Esta tecnología, al fomentar el desarrollo de nuevas plantas e instalaciones, también impulsa la creación de empleos, lo que se alinea con el ODS 8: “Trabajo decente y crecimiento económico”. A su vez, esto favorece la mejora de la infraestructura, contribuyendo al ODS 9: “Industria, innovación e infraestructura”. Finalmente, si estas iniciativas continúan siendo promovidas e implementadas a mayor escala, podrían contribuir al cumplimiento del ODS 11: “Ciudades y comunidades sostenibles” [6].

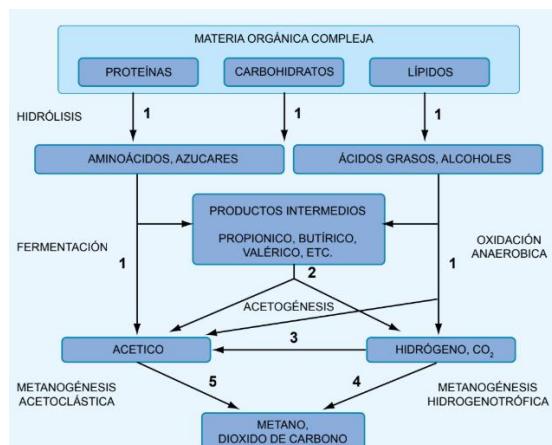
Este artículo tiene como objetivo promover la implementación de la energía renovable conocida como biomasa como una pieza clave en la economía circular, especialmente en la gestión integral de residuos orgánicos. A

través del proceso de digestión anaeróbica (DA), estos residuos pueden ser aprovechados como biomasa para su transformación en biogás y otros productos de valor, permitiendo su reintegración a la economía. Además, se abordarán los retos y desafíos que enfrenta este proceso para su implementación y optimización.

2. ¿QUÉ ES LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA?

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que ocurre en condiciones donde no hay oxígeno, ya que solo en estas circunstancias pueden desarrollarse ciertos microorganismos que permiten la descomposición de la materia orgánica. Este proceso se divide en cuatro etapas que suceden casi de manera simultánea [7] como se muestra en la Figura 1.

Fig. 1. Esquema de las reacciones en la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.



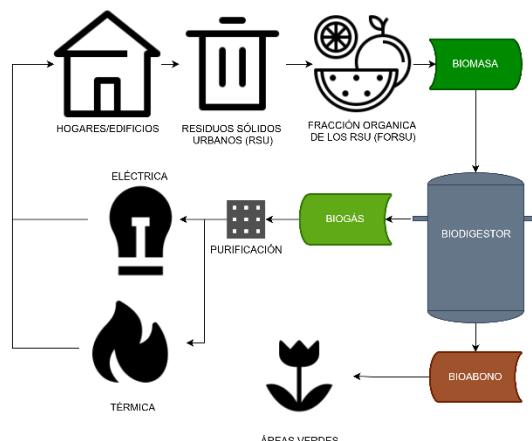
Fuente:[8]

La primera etapa es la *hidrólisis*, donde los polímeros complejos, como carbohidratos, proteínas y lípidos (grasas), se descomponen y se transforman en moléculas más simples, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Estas moléculas son aprovechadas en la siguiente etapa, conocida como *acidogénesis* o fermentativa, para convertirlas en ácidos grasos volátiles, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono (CO_2). Luego, en la *acetogénesis*, los compuestos intermedios se transforman en acetatos, hidrógeno y dióxido de carbono (CO_2). Finalmente, en la etapa de *metanogénesis*, estos compuestos son convertidos en metano (CH_4) y vapor de agua. Como resultado de este proceso, se obtiene un biocombustible en estado gaseoso conocido como “biogás”, compuesto principalmente por un 70% de metano (CH_4) y un 30% de dióxido de carbono (CO_2), aunque también pueden encontrarse otros gases, como vapor de agua o sulfuros. Además, como subproducto, se genera un biofertilizante rico en nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, que puede ser aprovechado en la agricultura [9], [10].

3. LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA COMO PARTE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

La economía circular es un modelo económico cuyo propósito es recircular productos que, en una economía lineal, serían desechados. Su objetivo es cerrar el ciclo de los residuos, reduciendo al mínimo su generación y promoviendo prácticas sostenibles como la reutilización de productos siempre que sea posible, la reparación antes de adquirir uno nuevo, el reciclaje y la producción de nuevos materiales a partir de estos residuos. En este contexto, la digestión anaeróbica (DA) juega un papel fundamental, ya que permite transformar Residuos Orgánicos (RO) en recursos aprovechables dentro de este modelo económico [11].

Fig. 2. Modelo de economía circular integrado con Digestión Anaeróbica.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra un diagrama que explica, de manera general, el ciclo de la biomasa en zonas residenciales, que incluyen hogares y/o edificios. En estos entornos se generan residuos sólidos urbanos (RSU), de los cuales la fracción orgánica (RSO o, como se menciona en el diagrama, FORSU) constituye biomasa aprovechable. Esta biomasa es procesada en un biodigestor, una tecnología diseñada para proporcionar las condiciones óptimas para la digestión anaeróbica (DA).

Como subproducto del proceso, los sólidos sedimentados en la parte inferior del biodigestor pueden ser utilizados como fertilizante en áreas verdes debido a su riqueza en nutrientes. Alternativamente, tras un tratamiento biológico, estos residuos pueden ser dispuestos en el alcantarillado, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental [12].

Por otro lado, el principal producto de la DA es el biogás, el cual debe someterse a un proceso de filtración para obtener biometano. Este biocombustible puede aprovecharse como fuente de energía térmica para la cocción de alimentos o el confort térmico, así como para la generación de energía eléctrica destinada a la iluminación o el uso de dispositivos electrónicos. De esta manera, se establece un esquema de economía circular que maximiza el aprovechamiento de los RO y reduce el impacto ambiental [13].

Si bien en la Figura 2 se presenta un ciclo ideal para el aprovechamiento de la biomasa dentro de un modelo de economía circular, es fundamental contar con el apoyo de la

sociedad para la implementación de este tipo de proyectos, especialmente en términos de educación ambiental. En muchos países del sur global, la clasificación de residuos no está plenamente integrada en las comunidades, lo que representa un desafío para la recolección eficiente de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) provenientes de hogares y edificios [14].

4. ENFOQUE CIRCULAR EN LAS APLICACIONES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Como se mencionó anteriormente, la biomasa al igual que otras energías renovables como lo pueden ser la energía solar, eólica, geotérmica, hidráulica, etc. Principalmente se centran en la generación de energía aprovechando el recurso existente en la región, es por eso que no existe "una mejor energía renovable que otra" si no que, existe la tecnología adecuada para cada caso particular para satisfacer necesidades específicas, además de que las energías renovables pueden fusionarse para hacer una tecnología aún más eficiente que solo aprovechar las ventajas de una sola [15].

La principal aplicación de la digestión anaeróbica (DA) es la generación de biogás, una mezcla de gases en la que el componente de mayor interés para la producción de energía eléctrica o térmica es el metano. Por ello, el biogás debe someterse a un proceso de purificación para eliminar impurezas como el dióxido de carbono (CO_2), el agua (H_2O), el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el amoníaco, entre otros. Una vez purificado, el biometano puede ser utilizado en motores de combustión interna, como los de los automóviles, donde la energía mecánica generada puede transformarse posteriormente en energía eléctrica [16]. Un estudio realizado por [17] en Brasil demuestra que el potencial energético del biogás podría alcanzar entre 4.5 y 6.9 GW de potencia eléctrica. Esto no solo contribuiría a la red eléctrica, sino que también permitiría una reducción anual del 4.93 % en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Además, según el informe, se podrían utilizar 180,000 camiones impulsados por biogás, lo que confirma su aplicación tanto en la generación de energía eléctrica como en el sector del transporte.

Para el aprovechamiento térmico del biogás, también es necesaria su purificación para garantizar una mayor eficiencia. Sin embargo, en este tipo de aplicación, la purificación no suele ser tan crítica, ya que los sistemas de quemadores pueden tolerar ciertas impurezas sin afectar significativamente su funcionamiento. No obstante, la presencia de estas impurezas a largo plazo podría provocar la corrosión de los componentes del quemador, reduciendo su vida útil y eficiencia [8].

De igual manera, este proceso no se limita únicamente a la generación de energía, sino que también funciona como un modelo de gestión integral de residuos, ya que contribuye a su adecuado manejo. Por ejemplo, la investigación de [18] sugiere que los rellenos sanitarios podrían considerarse

generadores de energía secundarios, debido a que liberan cantidades considerables de biogás. Este biogás contiene metano en una concentración que le otorga un poder calorífico de aproximadamente de 26.882 MJ/m³ o 37.50 MJ/kg, con una densidad de 0.717 kg/m³. Además, al quemar 0.025 m³ de biogás, se generan 2.54 kcal de energía térmica por cada 1 % de metano (CH₄) presente. Esto indicaría que, considerando un contenido de metano del 60 %, se obtendría un rendimiento energético de aproximadamente 5,400 kcal/m³ [19].

Además, no se restringe solo a los residuos sólidos orgánicos (RSO), sino que también se utiliza en el tratamiento de aguas residuales. A diferencia de un sistema aeróbico, la digestión anaeróbica es más eficiente en el tratamiento de residuos con alta carga orgánica, lo que la convierte en una alternativa viable para diversas aplicaciones [20].

También el aprovechamiento puede ser como combustible para vehículos. Un caso en México es la empresa Nopalimex, ubicada en el estado de Michoacán la cual opera desde el año 2010, es la primera empresa en dicho país en trabajar con un vehículo impulsado 100 % con biogás [21]

Por otro lado, para tener una referencia de los costos de una planta a pequeña escala (aplicable a pequeñas comunidades rurales y/o granjas), [22] realizó un análisis económico basado en tres plantas ubicadas en Cataluña, España, en las ciudades de Sant Celoni, Granollers y Castellar del Vallès. Dichas plantas gestionan residuos agropecuarios (purín vacuno y ensilado de maíz) en co-digestión con RO y tratan entre 1.23 m³/h y 1.34 m³/h, lo que equivale aproximadamente a 31 kWh de energía al día. Se estimó que la inversión inicial era de \$660,725.81 euros, lo que corresponde a aproximadamente \$71,376,465.99 dólares estadounidenses, mientras que los costos de operación rondan los \$15,000 euros al año, equivalentes a aproximadamente \$16,204.07 dólares estadounidenses. El estudio destaca que este costo operativo es relativamente bajo debido al tamaño reducido de la planta, lo que implica la necesidad de poco personal y menores gastos en mantenimiento o reposición de equipos. Además, en caso de ser necesario reemplazar algún componente, este sería de tamaño pequeño, lo que reduce significativamente los costos en comparación con los de una planta industrial.

5. DESAFÍOS Y LIMITACIONES

A lo largo del artículo, se han mencionado las ventajas del proceso de DA; sin embargo, las tecnologías que lo llevan a cabo, como los biodigestores, también enfrentan desafíos. Uno de estos retos es el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH). Este término hace referencia al tiempo que el material permanece dentro del biodigestor antes de completar su descomposición. Como se explicó anteriormente, en la etapa de hidrólisis ocurre la descomposición de macromoléculas en compuestos más simples y solubles, esenciales para las etapas posteriores del proceso. Aquí radica una de las principales

desventajas de esta tecnología: la producción de biogás no comienza de inmediato, sino que suele iniciarse entre los 10 y 15 días posteriores al inicio del proceso. No obstante, una vez que se genera biogás, es fundamental mantener condiciones óptimas dentro del biodigestor, como una alimentación adecuada, temperatura estable, flujos controlados y un pH equilibrado, entre otros factores, para asegurar su eficiencia y estabilidad [23].

El párrafo anterior nos lleva a otro desafío: el mantenimiento de condiciones óptimas. Esto se refiere a la necesidad de preservar un ecosistema estable dentro del biodigestor para garantizar la supervivencia de los microorganismos y el correcto desarrollo del proceso. Variaciones en factores clave, como la temperatura o la alimentación, pueden afectar negativamente a estos microorganismos y provocar la inhibición del proceso. Además, mantener estas condiciones de forma constante resulta complejo, lo que puede derivar en problemas operativos que afecten la eficiencia del sistema [24].

A diferencia del análisis de otros recursos renovables, como la energía solar, eólica e hidráulica, los cuales cuentan con instrumentos específicos para evaluar su calidad, el estudio del recurso biomásico representa un desafío mayor. Esto se debe a que su análisis requiere actividades como el muestreo, que implica la recolección de residuos en sitio para su posterior evaluación en laboratorio y la determinación de sus características físicoquímicas. Además, realizar estos análisis conlleva altos costos, ya que se necesitan viales específicos para la medición de carbono, nitrógeno y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Asimismo, la obtención de resultados puede tardar entre 2 y 3 días, incluyendo pruebas adicionales para determinar parámetros como densidad, porcentaje de humedad, Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos (SF) y Sólidos Volátiles (SV) [25].

Estos parámetros son determinantes, ya que la biomasa o la composición de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) pueden influir en la producción de biogás, generando variaciones tanto en su cantidad como en su calidad. Por ello, es fundamental conocer la cantidad, composición y características físicoquímicas de los residuos para seleccionar el tipo de biodigestor más adecuado y así aprovechar al máximo el recurso [26].

El proceso de digestión anaeróbica (DA) es fundamental para la transición de una economía lineal a una circular, ya que permite la revalorización de los residuos sólidos orgánicos (RSO), reduce las emisiones de gases contaminantes y genera productos de valor agregado, como el biogás. Sin embargo, su implementación en países como México enfrenta múltiples desafíos. Entre ellos, la falta de incentivos gubernamentales y un marco regulatorio poco eficiente para promover tecnologías de aprovechamiento de biomasa, especialmente aquellas enfocadas en el tratamiento de RSO, ya que su revalorización no es una prioridad en las políticas actuales. A esto se suma la falta de infraestructura adecuada para la gestión integral de residuos, lo que representa una barrera

importante para su implementación. Gran parte del éxito de estos procesos depende de la recolección y separación eficiente de los residuos, donde el aspecto social juega un papel clave. Sin una cultura de clasificación de desechos en origen, el aprovechamiento de los RSO se vuelve más complejo. Para superar estos desafíos, es esencial fortalecer la educación ambiental, desarrollar políticas públicas que incentiven la adopción de estas tecnologías y mejorar la infraestructura para su correcto funcionamiento [27].

6. CONCLUSIÓN

La difusión y adopción de este tipo de procesos permiten ampliar el conocimiento sobre alternativas más allá de los métodos convencionales, favoreciendo la transición hacia una economía más sostenible. No solo se trata de los beneficios económicos que estas tecnologías pueden generar, sino también de su potencial para optimizar la gestión de residuos con altos contenidos de humedad. Si bien la implementación de la DA enfrenta desafíos, estos no deben ser motivo de desánimo, sino un incentivo para encontrar soluciones efectivas que aborden el mal manejo de residuos, una problemática con graves consecuencias ambientales tanto a nivel local como global. Para lograrlo, es fundamental impulsar proyectos de esta índole y superar tanto los retos económicos como técnicos a través de políticas públicas, educación ambiental e inversión en infraestructura adecuada. Este tipo de tecnologías se han implementado principalmente en los sectores ganadero y agrícola debido a la gran cantidad de residuos generados en estos ámbitos. Su aplicación suele implicar el uso de contenedores herméticos (biodigestores) de gran tamaño y la facilidad de manejo de un solo tipo de residuo con características favorables para el proceso, como las excretas de vacas. No obstante, dado que su enfoque es tanto económico como ambiental, es posible optimizar su funcionamiento a través de la Co-Digestión Anaeróbica (Co-DA), un proceso que permite tratar dos o más residuos de manera conjunta para mejorar las deficiencias que un RSO o un tipo específico de biomasa puedan presentar. Aunque este enfoque no resuelve la problemática de manera integral, representa un avance importante en la mitigación de los impactos negativos asociados con la mala gestión de residuos.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONAHCYT por el apoyo durante esta investigación a través de la beca de posgrado, así como al Instituto de Ingeniería y Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UABC, que proporcionaron y facilitaron los medios para llevar a cabo esta investigación dentro del proyecto interno de UABC con clave 111/6/C/20/25, titulado “Transformando residuos en recursos: simbiosis industrial y economía circular en la producción de biogás y agua tratada con nejayote y bagazo de cerveza”.

8. REFERENCIAS

- [1] X. Wang *et al.*, “Emerging waste valorisation techniques to moderate the hazardous impacts, and their path towards sustainability,” *J Hazard Mater*, vol. 423, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127023.
- [2] H. K. Tatla, S. Ismail, M. A. Khan, B. R. Dhar, and R. Gupta, “Coupling hydrothermal liquefaction and anaerobic digestion for waste biomass valorization: A review in context of circular economy,” Aug. 01, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142419.
- [3] V. V. Zhazhkov, N. A. Politueva, K. A. Velmozhina, P. S. Shinkevich, and B. K. Norov, “Production of biogas from organic waste at landfills by anaerobic digestion and its further conversion into biohydrogen,” Jun. 12, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.062.
- [4] M. K. Awasthi *et al.*, “A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: Technological challenges, advancements, innovations, and future perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 111, pp. 115–131, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.017.
- [5] M. Cucina, “Integrating anaerobic digestion and composting to boost energy and material recovery from organic wastes in the Circular Economy framework in Europe: A review,” Dec. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biteb.2023.101642.
- [6] F. Piadeh *et al.*, “A critical review for the impact of anaerobic digestion on the sustainable development goals,” Jan. 01, 2024, *Academic Press.* doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119458.
- [7] Z. Fu, F. Liu, P. Li, Y. Zhang, and J. Chen, “Converting cellulose to biogas with anaerobic digestion at incubation temperatures of 5 °C difference in the effort for efficiency and low carbon emission,” *Ind Crops Prod*, vol. 224, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2024.120354.
- [8] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), *Manual_Biogás_FAO_2011*.
- [9] M. A. De La Rubia, F. Raposo, B. Rincón, and R. Borja, “Evaluation of the hydrolytic-acidogenic step of a two-stage mesophilic anaerobic digestion process of sunflower oil cake,” *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 18, pp. 4133–4138, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2009.04.001.
- [10] J. Jiang, Y. Zhang, K. Li, Q. Wang, C. Gong, and M. Li, “Volatile fatty acids production from food waste: Effects of pH, temperature, and organic loading rate,” *Bioresour Technol*, vol. 143, pp. 525–530, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.025.
- [11] R. V. Moharir, P. Gautam, and S. Kumar, “Waste treatment processes/technologies for energy recovery,” in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Waste Treatment Processes for Energy Generation*, Elsevier, 2019, pp. 53–77. doi: 10.1016/B978-0-444-64083-3.00004-X.
- [12] P. M. V. Subbarao, T. C. D’ Silva, K. Adlak, S. Kumar, R. Chandra, and V. K. Vijay, “Anaerobic digestion as a sustainable technology for efficiently utilizing biomass in the context of carbon neutrality and circular economy,”

- Oct. 01, 2023, Academic Press Inc. doi: 10.1016/j.envres.2023.116286.
- [13] R. Kapoor *et al.*, “Factors affecting methane loss from a water scrubbing based biogas upgrading system,” *Appl Energy*, vol. 208, pp. 1379–1388, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.09.017.
- [14] A. Gallego-Schmid *et al.*, “Circular economy in Latin America and the Caribbean: Drivers, opportunities, barriers and strategies,” Nov. 01, 2024, Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.spc.2024.09.006.
- [15] S. Buragohain, K. Mohanty, and P. Mahanta, “Hybridization of solar photovoltaic and biogas system: Experimental, economic and environmental analysis,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 45, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101050.
- [16] V. Vasan *et al.*, “Biogas production and its utilization in internal combustion engines - A review,” Jun. 01, 2024, Institution of Chemical Engineers. doi: 10.1016/j.psep.2024.04.014.
- [17] I. F. Silva dos Santos, N. D. Braz Vieira, L. G. B. de Nóbrega, R. M. Barros, and G. L. Tiago Filho, “Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement,” *Resour Conserv Recycl*, vol. 131, pp. 54–63, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.12.012.
- [18] V. V. Zhazhkov, N. A. Politueva, K. A. Velmozhina, P. S. Shinkevich, and B. K. Norov, “Production of biogas from organic waste at landfills by anaerobic digestion and its further conversion into biohydrogen,” Jun. 12, 2024, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.062.
- [19] A. Chusov, V. Maslikov, V. Badenko, V. Zhazhkov, D. Molodtsov, and Y. Pavlushkina, “Biogas potential assessment of the composite mixture from duckweed biomass,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14010351.
- [20] S. Yang, Z. Li, X. Wang, S. Cheng, and L. Zhu, “Research progress of enhanced methane production by anaerobic digestion of blackwater,” Jul. 01, 2023, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.jwpe.2023.103719.
- [21] Aké Madera Miguel Ángel, *Nopalimex Biogas con nopal para vehículos en sustitución de combustibles fosiles*, 1st ed. Ciudad de Mexico, 2017.
- [22] Atrio Corral Andrés and Rodriguez-Chueca Jorge Jesús, “Estudio de viabilidad de implementación de una planta de producción de biogás en la comunidad de Madrid,” Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2024.
- [23] Z. Xu, H. Yuan, and X. Li, “Anaerobic bioconversion efficiency of rice straw in continuously stirred tank reactor systems applying longer hydraulic retention time and higher load: One-stage vs. Two-stage,” *Bioresour Technol*, vol. 321, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124206.
- [24] P. Garkoti, J. Q. Ni, and S. K. Thengane, “Energy management for maintaining anaerobic digestion temperature in biogas plants,” Jul. 01, 2024, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2024.114430.
- [25] D. Alfredo *et al.*, “Número Especial de la Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada.”
- [26] P. M. V. Subbarao, T. C. D’ Silva, K. Adlak, S. Kumar, R. Chandra, and V. K. Vijay, “Anaerobic digestion as a sustainable technology for efficiently utilizing biomass in the context of carbon neutrality and circular economy,” Oct. 01, 2023, Academic Press Inc. doi: 10.1016/j.envres.2023.116286.
- [27] J. C. B. F. Bijos, V. M. Zanta, J. Morató, L. M. Queiroz, and K. P. S. R. Oliveira-Esquerre, “Improving circularity in municipal solid waste management through machine learning in Latin America and the Caribbean,” *Sustain Chem Pharm*, vol. 28, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.scp.2022.100740.