

Biochar de Residuos Sólidos de Naranja, como Mejorador de la Digestión Anaerobia

Julia Renata Hernández-Roa ¹, Joahnn Palacios ², Stéphane Godbout ², Ofelia Landeta-Escamilla ¹, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹ y Erik Samuel Rosas-Mendoza ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

² Research and Development Institute for the Agri-Environment, 2700 Einstein Street, Quebec City, QC, Canada

* Autor de correspondencia: eriksamuelfm@hotmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 17 de noviembre de 2026

Aceptado: 9 de abril de 2026

Publicado: 27 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.657>

Resumen: La industria citrícola, particularmente la del jugo de naranja, genera grandes volúmenes de residuos orgánicos cuya gestión inadecuada representa un problema ambiental, debido a la generación de lixiviados, gases de efecto invernadero y malos olores. Estos residuos poseen una composición rica en compuestos orgánicos que los convierte en materia prima con alto potencial de valorización. Una alternativa prometedora es la producción de biochar a partir de residuos sólidos de naranja mediante pirólisis de biomasa, proceso termoquímico que permite obtener un material carbonoso, estable, poroso y con diversas aplicaciones ambientales. El biochar ha sido reportado en la literatura como un material funcional en distintos procesos biotecnológicos. En particular, diversos estudios indican que la incorporación de biochar en la digestión anaerobia puede contribuir a mejorar la estabilidad del proceso y la producción de biogás, al favorecer la colonización microbiana, la retención de biomasa y la mitigación de inhibidores como los ácidos grasos volátiles y el amoníaco. El objetivo de este trabajo de divulgación es presentar y analizar el potencial del biochar producido a partir de residuos sólidos de naranja como mejorador de la digestión anaerobia, destacando los mecanismos reportados en la literatura y su relevancia para la valorización de residuos agroindustriales, la producción de energía renovable y el beneficio ambiental y social asociado a una gestión más sostenible de estos residuos.

Palabras clave: residuos sólidos de naranja, pirólisis de biomasa, digestión anaerobia, biochar

Introducción

El cultivo de cítricos es una actividad importante en el sector agrícola en muchos países, siendo la naranja la más consumida, seguida de limones, limas y toronjas. Datos oficiales estiman que la producción mundial de naranja durante el 2023-2024 fue 45.8 millones de toneladas métricas y más del 50 % de esta producción se destina a industrias de procesamiento de frutas (USDA, 2025). En este marco, los países con mayor producción son Brasil aportando el 26 % de la producción total, seguidos de China con 16.7 %, La Unión Europea con 12.5 %, México con 10.7 % y Egipto 9.2 % (USDA, 2025). De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de México (SIAP), la superficie total plantada de naranja en el territorio mexicano es de 353 mil hectáreas, mientras que la producción es de 3.4 millones de toneladas, siendo Veracruz el principal estado productor aportando el 64.9 % de la producción total nacional (2.2 millones de toneladas), seguido de Tamaulipas, Puebla, San Luis Potosí y Nuevo León (USDA, 2024). En la Figura 1 se muestra la distribución de la producción de naranja a nivel mundial y en México, lo que permite dimensionar la magnitud del residuo generado.



Figura 1. Producción de naranja a nivel mundial y en el territorio mexicano.

Por otro lado, la industria del procesamiento de naranja genera diferentes tipos de productos y subproductos. Los productos a base de naranja más conocidos son el jugo, las jaleas, las mermeladas y los aceites esenciales, (Ortiz-Sánchez *et al.*, 2024). Como resultado de la alta producción y procesamiento de la naranja, cada año se generan grandes cantidades de Residuos Sólidos de Naranja (RSN). Los RSN constituyen aproximadamente el 50-60 % de la fruta procesada, y esta fracción está compuesta por cáscara (50-60 %), pulpa o tejido interno (30-35 %) y semillas (<1-10 %) (de Lima *et al.*, 2022; Jiménez-Castro *et al.*, 2020). En la Figura 2 se presentan los principales componentes de la naranja, destacando la fracción residual generada después de su procesamiento industrial. De acuerdo con Senit *et al.* (2019), la cáscara de naranja está compuesta por azúcar (35 %), pectina (19 %), lignina (7 %), hemicelulosa (14 %), celulosa (19 %) y cenizas (3.7 %); además la composición química contiene: 3.5 % cenizas, 1.95 % lípidos, 5.8 % proteína, 2.3 % ácido láctico, 2 % ácido acético, 0.06 % ácido isobutírico, y 0.73 % calcio. Los RSN se caracterizan por tener valores de pH bajos (3-4) y la presencia de aceites esenciales, principalmente D-limoneno (Bouaita *et al.*, 2022). Esta composición rica en azúcares y aceites esenciales dificulta su gestión adecuada y favorece procesos de degradación incontrolada cuando los residuos no reciben un tratamiento apropiado. Un alto porcentaje de los RSN tiene como destino final los vertederos o rellenos sanitarios sin ningún tratamiento adecuado previo, lo que provoca problemas medioambientales afectando los recursos naturales como consecuencia de la dispersión de subproductos de la degradación biológica como lixiviados. De igual manera, los RSN generan gases y malos olores durante su descomposición, tales gases como metano y dióxido de carbono, que son gases contribuyentes al efecto invernadero (Bouaita *et al.*, 2022).

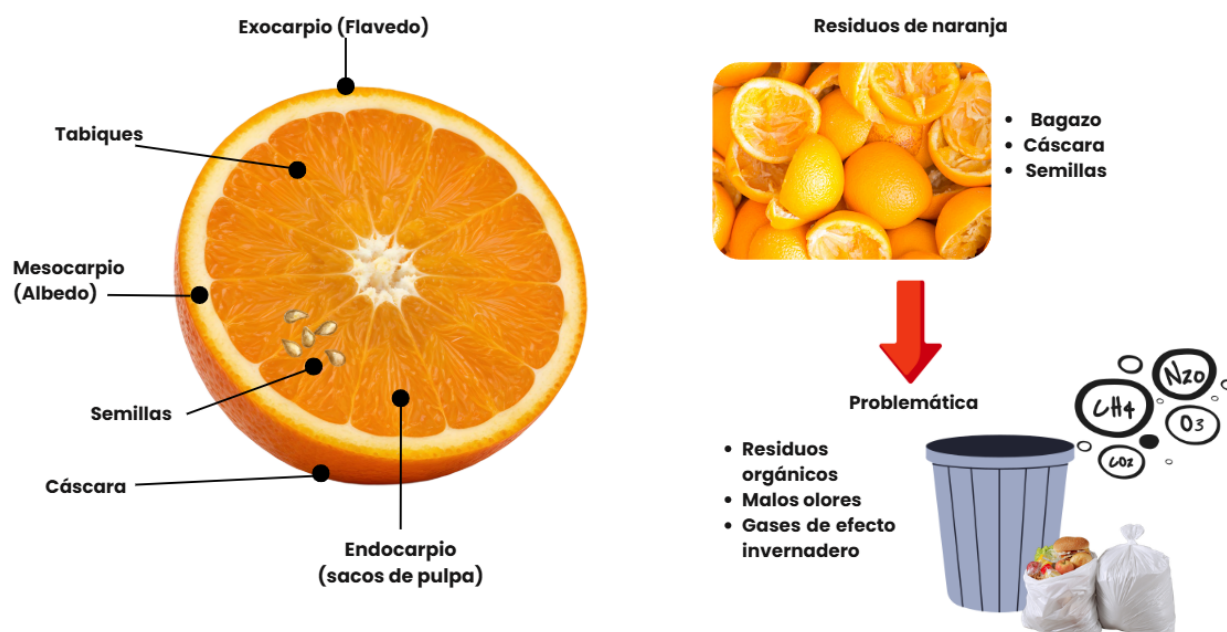


Figura 2. Composición de la naranja y generación de los residuos sólidos.

Las rutas convencionales para el manejo de los RSN como el vertido, el compostaje o su uso en la alimentación animal no son alternativas sostenibles, ya que impiden aprovechar el valor potencial de cada fracción del residuo (Manakas *et al.*, 2025). En particular, el vertido presenta múltiples inconvenientes y riesgos tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Por otro lado, el compostaje puede ofrecer beneficios como la mejora de la fertilidad del suelo y la protección de las plantas (Sharma *et al.*, 2022), también enfrenta limitaciones, entre ellas un pH bajo y la presencia de aceites esenciales que dificultan el proceso. En cuanto a la alimentación animal, si bien es una de las estrategias de valorización más utilizadas para los RSN y puede considerarse ambientalmente adecuada, también presenta limitaciones que reducen su viabilidad a gran escala (Manakas *et al.*, 2025). Se han propuesto varias estrategias de valorización para este tipo de residuo, pero ninguna puede considerarse resolutive. Estos residuos, ricos en compuestos orgánicos, son una fuente potencial de energía y materiales útiles si se gestionan adecuadamente. Las estrategias de valorización más prometedoras incluyen: 1) Tecnologías de bioconversión para la producción de bioquímicos como ácido láctico y bioenergía (Mohsin *et al.*, 2021), 2) Producción de bioetanol a través de la fermentación de los azúcares reductores generados a partir de los RSN (Ayala *et al.*, 2021; Gervasi y Mandalari, 2024) y 3) Extracción de compuestos de alto valor como aceites esenciales, pectina y carotenoides (Manakas *et al.*, 2025). Ahora bien, la digestión anaerobia (DA) se ha consolidado como una alternativa eficaz para la valorización de los RSN, ya que estos residuos son un sustrato

prometedor para la producción de biogás, compuesto principalmente por metano (65-70 %) y dióxido de carbono (Bouaita *et al.*, 2022). En la Figura 3 se presenta un diagrama de la producción, gestión y valorización de la naranja y los residuos de dicho producto.

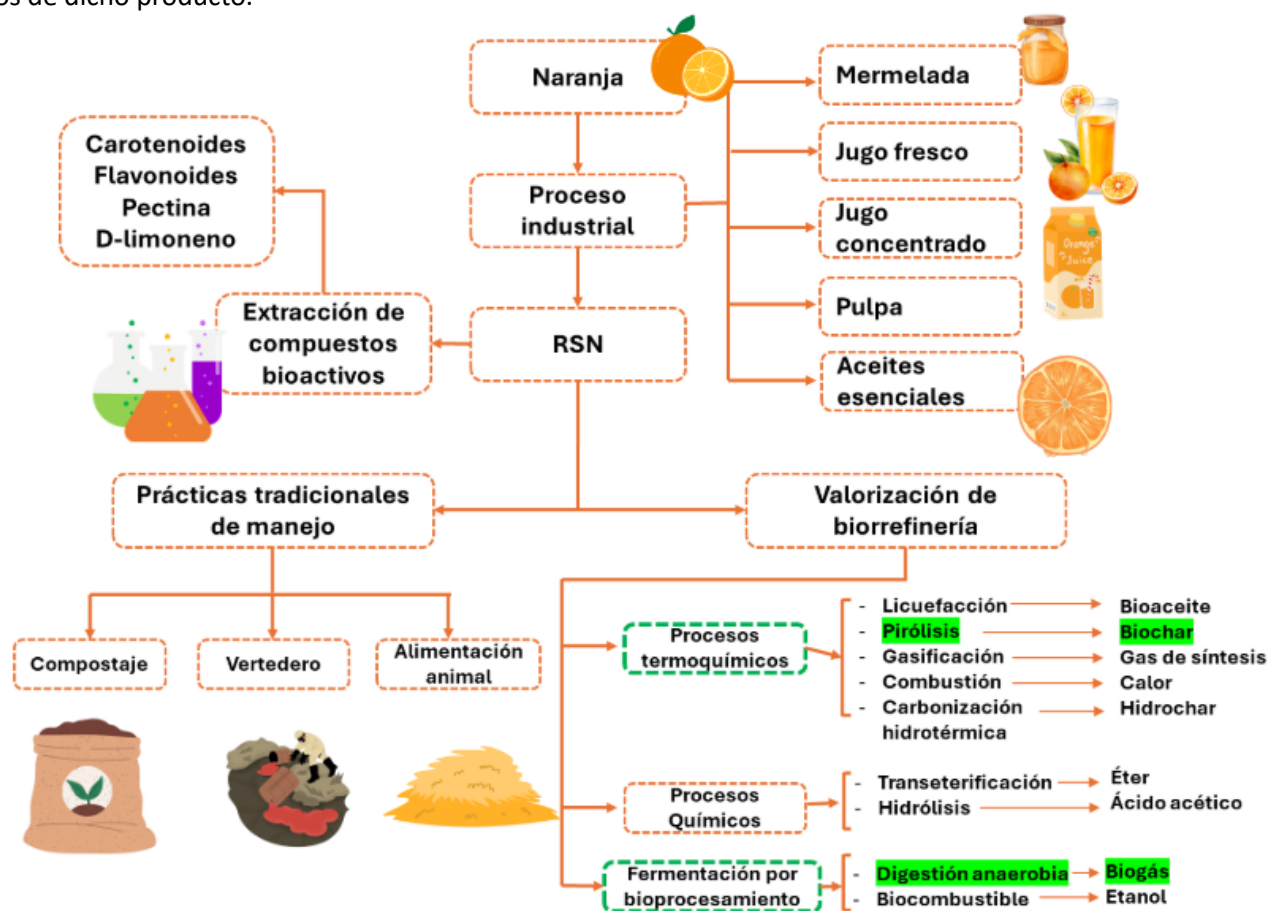


Figura 3. Diagrama de la producción, gestión y valorización de la naranja y los residuos de naranja.

Para la valorización de materias primas lignocelulósicas como los RSN, se pueden emplear métodos termoquímicos, sin embargo, la pirólisis destaca como una de las alternativas más prometedoras. En este sentido, la pirólisis es un proceso mediante el cual se realiza la conversión de la biomasa en biochar, que es un material sólido negro, poroso y rico en carbono, que puede tener múltiples aplicaciones, como: en la enmienda de suelos, soporte microbiano, adsorbente de contaminantes o mejorador de procesos biotecnológicos. Aunque el biochar guarda ciertas similitudes con el carbón vegetal, ambos difieren en su propósito y condiciones de producción. El carbón vegetal se obtiene principalmente con fines energéticos, buscando maximizar el poder calorífico del material. En cambio, el biochar es un material químicamente estable, altamente poroso y con elevada capacidad de adsorción.

En este contexto, resulta relevante analizar alternativas que permitan una gestión más eficiente y sostenible de los RSN, integrando procesos de valorización energética y ambiental. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es presentar una revisión sobre la producción de biochar a partir de residuos sólidos de naranja y su aplicación como mejorador en procesos de digestión anaerobia, haciendo énfasis en los mecanismos que explican su efecto sobre la estabilidad del proceso y la producción de biogás, así como en su potencial para la valorización de residuos agroindustriales.

Desarrollo

Proceso de pirólisis para la conversión termoquímica de RSN

El biochar se produce mediante pirólisis, por el calentamiento de biomasa bajo condiciones de oxígeno limitado o en ausencia total. Este proceso implica la descomposición térmica de la materia orgánica a temperaturas generalmente entre 400 y 800 °C, lo que provoca la carbonización parcial de la biomasa. La eficiencia y los productos obtenidos

durante la pirólisis dependen de varios factores, entre ellos el tamaño de partícula, la temperatura de reacción, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia. De acuerdo con estos parámetros, la pirólisis se puede clasificar en lenta, rápida o flash (Wang y Wu, 2023). Durante el proceso, las partículas sólidas de biomasa se calientan en una atmósfera inerte, donde el calor se transfiere primero a la superficie por radiación y/o convección y posteriormente hacia el interior. A medida que la temperatura aumenta, se elimina la humedad, es decir el agua se convierte en vapor y la biomasa se deshidrata, lo que disminuye el peso de la materia prima y se inicia la descomposición térmica de los componentes orgánicos (Ahmed *et al.*, 2024). Los productos volátiles y gaseosos generados fluyen a través de los poros de las partículas, participando activamente en la transferencia de calor y masa dentro de la partícula. A lo largo del proceso, los poros del material sólido se expanden, incrementando la porosidad de la partícula a medida que la biomasa se transforma en gases. Como resultado de la descomposición de la biomasa, la ruptura de largas cadenas de compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno se producen moléculas más pequeñas durante la pirólisis, y se generan gases y vapores condensables (como alquitranes y aceites) y un residuo sólido carbonoso (Joshi *et al.*, 2024).

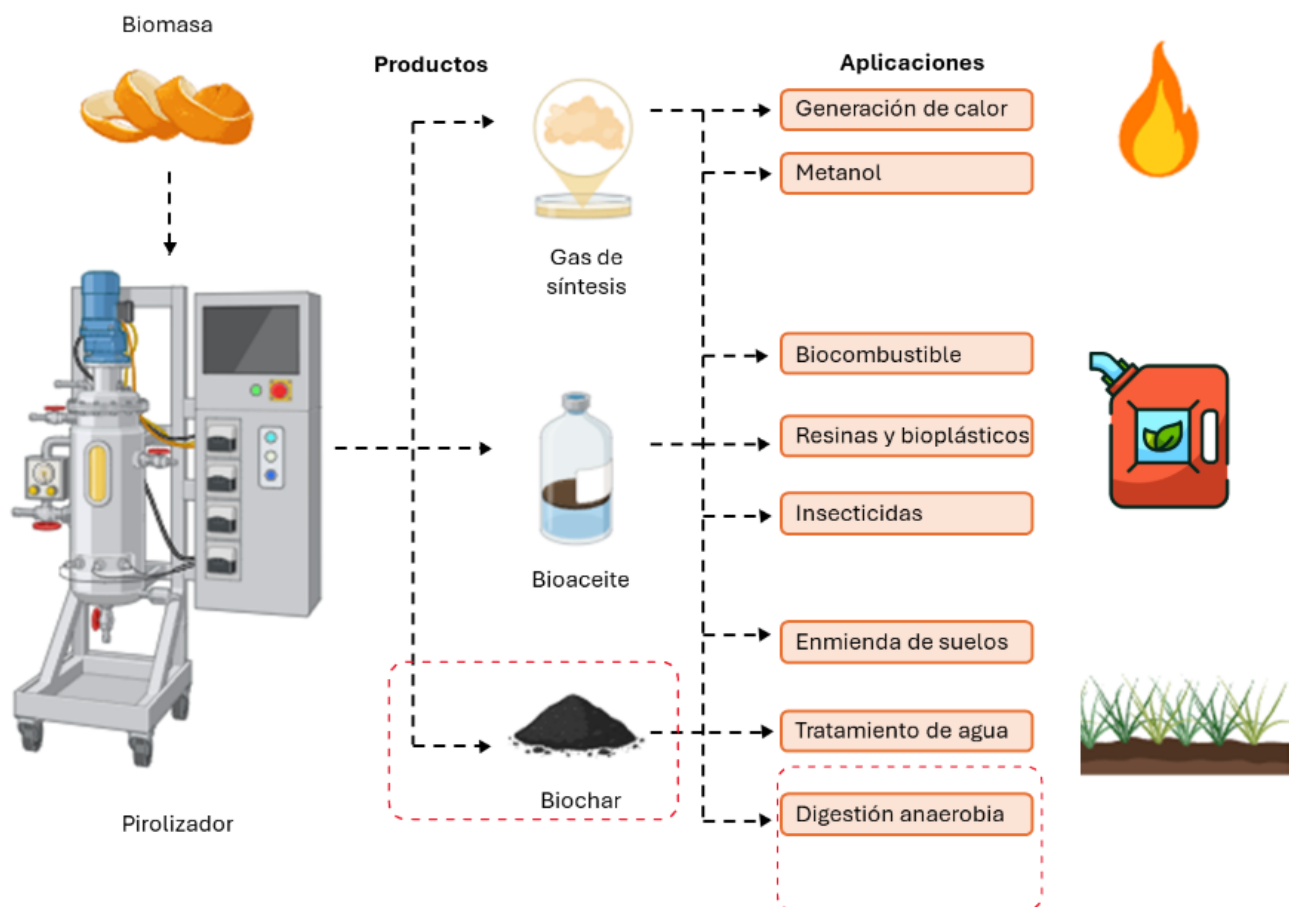


Figura 4. Proceso de pirólisis, productos derivados y sus aplicaciones.

En términos generales, la pirólisis genera tres fracciones principales: una gaseosa (gas de síntesis), una líquida (bioaceite), y una sólida (biochar). Las propiedades y el rendimiento del biochar dependen principalmente de las condiciones de operación y del tipo de biomasa empleada. El biochar producido a partir de los RSN, presenta una estructura altamente porosa y una superficie con grupos funcionales que favorecen interacciones químicas y biológicas útiles en aplicaciones ambientales y biotecnológicas. En la Figura 4 se esquematiza el proceso de pirólisis, así como los principales productos obtenidos y sus aplicaciones ambientales.

Proceso biotecnológico: Digestión anaerobia (DA)

Por otro lado, la DA es un proceso biotecnológico que comprende una serie de reacciones bioquímicas mediante las cuales microorganismos anaerobios descomponen la materia orgánica de distintos sustratos en condiciones libres de oxígeno, produciendo una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2),

hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Uddin y Wright, 2023). Este proceso se desarrolla generalmente en reactores cerrados, donde la materia orgánica biodegradable es transformada en biogás y digestato. El biogás obtenido se utiliza ampliamente en la generación de energía térmica y eléctrica, ofreciendo una alternativa más sostenible que los métodos tradicionales de gestión de residuos, como la incineración o el vertedero (Tiwarly *et al.*, 2015; Ambaye *et al.*, 2021).

El proceso de DA se divide en cuatro etapas principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, cada una de ellas llevada a cabo por comunidades microbianas específicas que operan bajo condiciones fisicoquímicas particulares (Wang *et al.*, 2023). Durante la hidrólisis, los compuestos poliméricos como carbohidratos, proteínas y lípidos son degradados en moléculas solubles más simples, es decir azúcares, aminoácidos y ácidos grasos mediante enzimas extracelulares secretadas por bacterias hidrolíticas. Posteriormente, en la acidogénesis, estos compuestos se transforman en ácidos grasos volátiles (AGVs), ácido láctico, hidrógeno (H_2), alcohol, dióxido de carbono (CO_2). En la acetogénesis, los AGVs y alcoholes de cadena larga son convertidos en acetato e hidrógeno, los cuales sirven como sustrato para la etapa final de metanogénesis, etapa donde los microorganismos metanogénicos transforman dichos compuestos en metano y dióxido de carbono, generando así biogás (Manga *et al.*, 2023). En la Figura 5 se presenta un esquema detallado de este proceso.

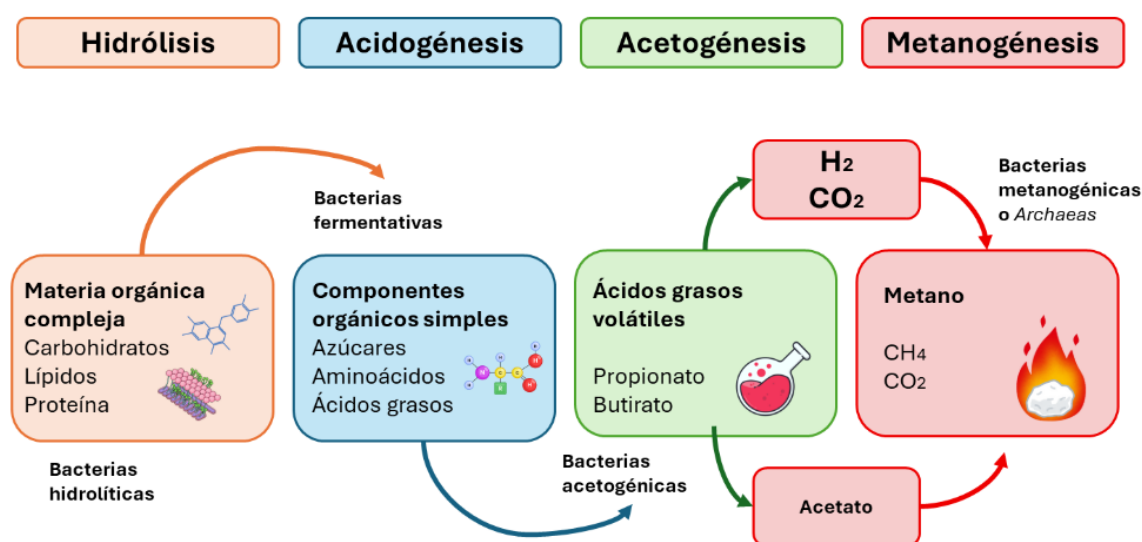


Figura 5. Etapas del proceso de digestión anaerobia.

A pesar de su eficiencia, la digestión anaerobia puede enfrentarse a diversas limitaciones por la acumulación excesiva de ácidos grasos volátiles (AGVs), amoníaco y metales pesados, lo cual provoca una disminución del pH y un desequilibrio entre las poblaciones acidogénicas y metanogénicas, lo que puede inhibir la producción de metano y reducir la estabilidad del sistema. Además, la presencia de dichos inhibidores puede afectar a la transferencia directa de electrones entre especies influyendo negativamente en la eficiencia global del proceso (Tshikovh y Motaung, 2023; Manga *et al.*, 2023).

Mecanismos para la mejora de DA a través de la adición de biochar

En este contexto, la incorporación de biochar se ha propuesto como una estrategia prometedora para mejorar la estabilidad y el rendimiento de la digestión anaerobia. El biochar puede mejorar la producción de metano al acelerar la fase de metanogénesis, proteger a los microorganismos de impactos tóxicos, ya que éste actúa como coadyuvante para la colonización microbiana favoreciendo la formación de biopelículas, mejorando la retención de biomasa dentro del reactor y reduciendo la inhibición por presencia de amoníaco (Manga *et al.*, 2023). Además, debido a su conductividad, el biochar se puede utilizar como conductor y permite la transferencia directa de electrones entre especies, entre bacterias y microorganismos productores de metano, acelerando las rutas de producción de metano y mitigando los efectos adversos de la acumulación de AGVs. De esta manera, el biochar contribuye tanto a la resiliencia microbiana como a la eficiencia energética del sistema mediante los siguientes mecanismos:

Inhibición del amoníaco

El nitrógeno amoniacal producido durante la DA sirve como suplemento nutritivo y proporciona alcalinidad parcial, sin embargo, en altos niveles el nitrógeno amoniacal inhibe la metanogénesis, lo que resulta en la acumulación de AGVs y una baja producción de metano (Ambaye *et al.*, 2021). Agregar biochar al proceso de DA puede ayudar a aumentar su resistencia a altas concentraciones de amoníaco y nitrógeno. El biochar brinda un espacio en el que los microorganismos pueden crecer y formar biopelículas, lo que obstruye la inhibición del amoníaco y además, los grupos funcionales presentes en la superficie del biochar reaccionan con el amoníaco y puede hacerlo no reactivo (Manga *et al.*, 2023).

Reducción de ácidos grasos volátiles

La etapa de hidrólisis conduce a la formación de ácidos orgánicos y la acumulación de éstos ácidos produce fluctuaciones en los niveles de pH del proceso de DA. Este efecto generalmente es contrarrestado por microorganismos acetógenos y metanógenos sintróficos, que convierten los AGVs en metano y dióxido de carbono. Sin embargo, cuando la tasa de producción de AGVs excede la tasa de consumo, puede producirse la acumulación de AGVs, lo que resulta en una caída del pH e incluso en el fracaso de la DA (Chiappero *et al.*, 2020). Para una mejor relación sintrófica, el pH del reactor anaerobio debe mantenerse en un rango neutro, una de las propiedades del biochar es su naturaleza altamente básica, o su capacidad tampón la cual depende de los grupos funcionales en el biochar como la amina, y la presencia de metales alcalinos y alcalinotérreos, esta característica puede aliviar la inhibición ácida provocada por la acidificación hidrolítica (Ambaye *et al.*, 2021; Manga *et al.*, 2023).

Efecto del biochar sobre los microorganismos

La aplicación de biochar al proceso de DA proporciona una plataforma para atrapar microorganismos, mantenerlos unidos y colonizar las comunidades microbianas, formar biopelículas y aclimatar microorganismos, facilitando de esta manera la transferencia directa de electrones entre especies, previniendo así la eliminación de microorganismos. Además, el biochar fortalece las comunidades microbianas al catalizar la generación y operación de diferentes grupos de microorganismos beneficiosos (Manga *et al.*, 2023).

Tabla 1. Revisión de literatura de la producción de biochar a partir de diferentes biomásas para su aplicación en DA

Referencia	Materia prima del biochar	Condiciones de pirólisis	Tipo de digestión anaerobia	Efecto reportado*
Kalengyo <i>et al.</i> 2023	Cáscara de cítricos	550-600 °C	No especificado	↑ Producción de biogás (258.5 ± 13.7 mL CH ₄ /g DQO); ↓ acidificación; ↑ actividad microbiana y retención de nutrientes
Aramrueang <i>et al.</i> 2022	Residuos forestales de madera	No especificado	Por lotes	↓ AGVs (18.9 a 1.5 g/L); ↑ pH óptimo; ↑ transferencia de electrones y formación de biopelículas
Sugiarto <i>et al.</i> 2021	Aserrín de pino	650-900 °C	Por lotes	↑ Producción de CH ₄ (hasta 46.9%); ↓ AGVs; ↑ degradación de propionato y acetato
Wang <i>et al.</i> 2021	Maíz	300-500 °C	Digestor en paralelo	↑ Producción de CH ₄ (BC400); ↓ AGVs; ↑ eficiencia de eliminación de SSV; ↑ transferencia de electrones
Ambaye <i>et al.</i> 2020	Lodos de depuradora	350-550 °C	No especificado	↑ Producción de CH ₄ (hasta 285.7 mL CH ₄ /g DQO); ↓ AGVs; ↑ estabilidad del pH
Jiang <i>et al.</i> 2020	Cáscara de cítricos	500 °C	Por lotes	↑ Producción de CH ₄ ; ↓ tiempo de retardo; ↓ AGVs; ↑ eliminación de DQO
Wei <i>et al.</i> 2020	Rastrojos de maíz	600 °C	Por lotes	↑ Producción de CH ₄ (8.6–17.8%); ↓ CO ₂ y NH ₃ -N; ↑ calidad del biogás

* ↑ Aumenta; ↓ Disminuye

Transferencia directa de electrones entre especies (TDEE)

Durante la etapa final de la DA, los metanógenos reducen el CO_2 a carbonatos, esta reducción depende en gran medida de la simbiosis que las bacterias acetogénicas oxidantes de ácidos orgánicos establecen con los microorganismos productores de metano (Chiappero *et al.*, 2020). Por lo tanto, la TDEE es fundamental para mantener estas relaciones simbióticas entre bacterias y arqueas para permitir la conversión eficiente de la materia orgánica en metano. Generalmente, esta transferencia ocurre de forma indirecta, a través de compuestos intermedios como el hidrógeno y el formiato, los cuales actúan como portadores de electrones entre las bacterias fermentativas y las arqueas. Sin embargo, este mecanismo depende de la difusión de metabolitos solubles, lo que puede limitar la velocidad del proceso (Manga *et al.*, 2023). Una alternativa más eficiente es la TDEE, es decir sin necesidad de intermediarios químicos, por medio de la adición de materiales conductores como grafeno, carbón activado, magnetita o biochar; lo que acelera las reacciones metabólicas. En particular, el biochar favorece la TDEE gracias a sus propiedades superficiales y su conductividad eléctrica, facilitando el flujo de electrones y, con ello, mejorando la estabilidad y la velocidad del proceso de digestión anaerobia (Manga *et al.*, 2023).

Calidad del digestato

El digestato es un producto final de la digestión anaerobia y está compuesto de materias primas recalcitrantes no digeridas en el reactor anaerobio, que son alrededor del 45 % de los compuestos orgánicos. La aplicación de biochar en el proceso de DA acelera el proceso de descomposición y transforma los materiales orgánicos presentes en el proceso de DA en carbono orgánico disuelto (en el digestato), que es vital para el crecimiento de las plantas y ayuda a mejorar la capacidad de retención de agua del suelo (Manga *et al.*, 2023).

Con el fin de presentar información clave reportada en la literatura y facilitar la comprensión de los efectos del biochar en la digestión anaerobia, en la Tabla 1 se resumen diversos estudios que emplean biochar producido a partir de distintos residuos, destacando las condiciones de pirólisis, el tipo de reactor y los principales efectos observados. Ahora bien, en la Tabla 2 se resumen las propiedades del biochar y la influencia que tienen en el proceso de DA.

Tabla 2. Papel del biochar en el proceso de digestión anaerobia

Propiedades del biochar	Función	Resultado
Superficie	Eliminación de gas por adsorción del proceso de DA. Proporciona superficie para la formación de biopelículas y la colonización de microorganismos	Mitigación de la inhibición del amoníaco
Porosidad	Promueve la formación de biopelículas, ayuda a la captura de dióxido de carbono, y sulfuro de hidrógeno.	Desarrollo microbiano
Grupos funcionales	Grupos ricos en oxígeno reaccionan con el amoníaco y lo inactivan.	Transferencia directa de electrones entre especie
Alcalinidad	Ayuda en la amortiguación ácida. Ayuda a la eliminación de CO_2 mediante la formación de carbonatos.	Reducción de la inhibición de AGVs

Conclusiones

La valorización de residuos sólidos de naranja mediante la producción de biochar es una alternativa prometedora frente a los esquemas tradicionales de disposición final, permitiendo transformar un problema ambiental en un recurso con aplicaciones de alto valor. El uso de biochar como aditivo en la digestión anaerobia ha sido reportado en la literatura como una estrategia capaz de mejorar la estabilidad del proceso y favorecer la producción de biogás, contribuyendo así a la generación de energía renovable.

Más allá de sus beneficios técnicos, la integración del biochar en procesos de digestión anaerobia ofrece ventajas ambientales y sociales relevantes, como la reducción de emisiones asociadas a la degradación incontrolada de residuos, el aprovechamiento energético de subproductos agroindustriales y el impulso a esquemas de economía circular. En

este sentido, el biochar derivado de residuos cítricos no sólo actúa como un material funcional dentro del reactor, sino también como una herramienta para promover una gestión más responsable y sostenible de los residuos agroindustriales.

Agradecimientos: Al Tecnológico Nacional de México por el apoyo para la realización de esta investigación. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca nacional con número de registro 4019882. Al programa Líderes Emergentes en las Américas (ELAP) de Global Affairs Canada por la asignación de la beca con número 001273805. Al equipo de ingeniería agroambiental del Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) por el apoyo brindado durante la estancia.

Bibliografía

- Ahmed, S. F., Mehejabin, F., Chowdhury, A. A., Almomani, F., Khan, N. A., Badruddin, I. A., & Kamangar, S. (2024). Biochar produced from waste-based feedstocks: Mechanisms, affecting factors, economy, utilization, challenges, and prospects. *GCB Bioenergy*, 16(8), 1–37. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13175>
- Ambaye, T. G., Rene, E. R., Nizami, A.-S., Dupont, C., Vaccari, M., & Van Hullebusch, E. (2021). Beneficial role of biochar addition on the anaerobic digestion of food waste: A systematic and critical review of the operational parameters and mechanisms. *Journal of Environmental Management*, 290(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112537>
- Ayala, J., Montero, G., Coronado, M., García, C., Curiel-Alvarez, M., León, J., Sagaste, C., & Montes, D. (2021). Characterization of orange peel waste and valorization to obtain reducing sugars. *Molecules*, 26(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/molecules26051348>
- Bouaita, R., Derbal, K., Panico, A., Iasimone, F., Pontoni, L., Fabbricino, M., & Pirozzi, F. (2022). Methane production from anaerobic co-digestion of orange peel waste and organic fraction of municipal solid waste in batch and semi-continuous reactors. *Biomass and Bioenergy*, 160(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106421>
- Chiappero, M., Norouzi, O., Hu, M., Demichelis, F., Berruti, F., Di Maria, F., Mašek, O., & Fiore, S. (2020). Review of biochar role as additive in anaerobic digestion processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131(1), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110037>
- de Lima, L. F., Monteiro, V. C., Barquilha, C. R., & Braga, M. B. (2022). Production of biochars derived from sewage sludge and orange peels. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.5902/2236117062692>
- Gervasi, T., & Mandalari, G. (2024). Valorization of agro-industrial orange peel by-products through fermentation strategies. *Fermentation*, 10(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/fermentation10050224>
- Jiménez-Castro, M. P., Buller, L. S., Sganzerla, W. G., & Forster-Carneiro, T. (2020). Bioenergy production from orange industrial waste: A case study. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(6), 1239–1253. <https://doi.org/10.1002/bbb.2128>
- Joshi, N. C., Sinha, S., Bhatnagar, P., Nath, Y., Negi, B., Kumar, V., & Gururani, P. (2024). A concise review on waste biomass valorization through thermochemical conversion. *Current Research in Microbial Sciences*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100237>
- Manakas, P., Balafoutis, A., Kottaridi, C., & Vlysidis, A. (2025). Sustainability assessment of orange peel waste valorization pathways from juice industries. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(1), 6525–6544. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05626-x>
- Manga, M., Aragón-Briceño, C., Boutikos, P., Semiyaga, S., Olabinjo, O., & Muoghalu, C. (2023). Biochar and its potential application for the improvement of the anaerobic digestion process: A critical review. *Energies*, 16(10), 1–23. <https://doi.org/10.3390/en16104051>
- Mohsin, A., Hussain, M. H., Zaman, W. Q., Mohsin, M. Z., Zhang, J., Liu, Z., Tian, X., Rehman, S., Khan, I., Niazi, S., Zhuang, Y., & Guo, M. (2021). Advances in sustainable approaches utilizing orange peel waste to produce highly value-added bioproducts. *Critical Reviews in Biotechnology*, 42(8), 1284–1303. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.200280>
- Senit, J. J., Velasco, D., Manrique, A. G., Sanchez-Barba, M., Toledo, J. M., Santos, V. E., Garcia-Ochoa, F., Yustos, P., & Ladero, M. (2019). Orange peel waste upstream integrated processing to terpenes, phenolics, pectin and monosaccharides: Optimization approaches. *Industrial Crops and Products*, 134(1), 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.060>
- Sharma, P., Vishvakarma, R., Gautam, K., Vimal, A., Kumar, V., Farooqui, A., Varjani, S., & Younis, K. (2022). Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*, 351(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127064>
- Sieradzka, M., Kirczuk, C., Kalemba-Rec, I., Mlonka-Mędrala, A., & Magdziarz, A. (2022). Pyrolysis of biomass wastes into carbon materials. *Energies*, 15(5), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en15051941>
- Tiwary, A., Williams, I., Pant, D., & Kishore, V. (2015). Assessment and mitigation of the environmental burdens to air from land applied food-based digestate. *Environmental Pollution*, 203(1), 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.001>
- Tshikovhi, A., & Motaung, T. E. (2023). Technologies and innovations for biomass energy production. *Sustainability*, 15(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su151612121>
- Uddin, M., & Wright, M. (2023). Anaerobic digestion fundamentals, challenges, and technological advances. *Physical Sciences Reviews*, 8(9), 2819–2837. <https://doi.org/10.1515/psr-2021-0068>
- United States Department of Agriculture. (2024). *Foreign Agricultural Service report MX2024-0063 global agricultural information network*. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Citrus%20Annual_Monterrey%20ATO_Mexico_MX2024-0063.pdf
- Wang, Y., & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113754>
- Wang, Z., Hu, Y., Wang, S., Wu, G., & Zhan, X. (2023). A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and improvement strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113208>