

Estrategias y tecnologías para gestionar de manera integral los residuos sólidos en las agroindustrias azucareras

Strategies and technologies for integrated solid waste management in sugar agro-industries

Ulises Uribel Pino Ortega¹ y Stefany Zuleika Nieto Batista²

¹Universidad de Panamá, ulisespino01@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0033-9517>, Panamá.

²Universidad de Panamá, stefanynieto05@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8520-2631>, Panamá.

Información del Artículo

Trazabilidad:

Recibido 23-07-2025

Revisado 24-07-2025

Aceptado 26-08-2025

Palabras Clave:

Residuos sólidos

Agroindustria azucarera

Economía circular

Sostenibilidad

RESUMEN

La agroindustria azucarera, uno de los sectores más relevantes en países tropicales, enfrenta el desafío de gestionar los residuos sólidos derivados de su producción, principalmente el bagazo y la cachaza. Estos subproductos, generados en grandes volúmenes, representan tanto una amenaza ambiental como una oportunidad económica si se valorizan adecuadamente. Este artículo analiza estrategias y tecnologías emergentes para la gestión integral de estos residuos en un enfoque de sostenibilidad y economía circular. Se presentan casos exitosos que destacan la implementación de digestión anaerobia, pirólisis, compostaje y producción de biocombustibles, subrayando su impacto en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, mejora de suelos y generación de energía. Además, se discuten los desafíos económicos, técnicos y regulatorios que enfrentan las agroindustrias, así como las oportunidades de innovación tecnológica y colaboración intersectorial. Este trabajo propone un marco metodológico integral para optimizar la gestión de bagazo y cachaza, garantizando la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico del sector.

Keywords:

Solid waste

Sugar agro-industry

Circular economy

Sustainability

ABSTRACT

The sugar agro-industry, one of the most relevant sectors in tropical countries, faces the challenge of managing the solid waste derived from its production, mainly bagasse and cachaza. These by-products, generated in large volumes, represent both an environmental threat and an economic opportunity if properly valued. This article analyses strategies and emerging technologies for the integrated management of these wastes within a sustainability and circular economy approach. Successful cases highlighting the implementation of anaerobic digestion, pyrolysis, composting and biofuel production are presented, highlighting their impact on greenhouse gas emissions mitigation, soil improvement and energy generation. In addition, the economic, technical and regulatory challenges faced by agro-industries are discussed, as well as opportunities for technological innovation and cross-sectoral collaboration. This paper proposes a comprehensive methodological framework to optimize bagasse and cachaza management, ensuring environmental sustainability and economic development of the sector.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria azucarera desempeña un papel crucial en las economías de países tropicales, siendo la caña de azúcar uno de los cultivos más importantes en términos de producción y generación de empleo. Actualmente, con una tendencia a incrementar sus demandas de producción, debido a las perspectivas macroeconómicas a nivel mundial, gracias a que el mercado requiere en gran magnitud de azúcar y melaza para la producción agroindustrial (Lagos & Castro, 2019). Sin embargo, el crecimiento de este sector ha traído consigo desafíos significativos en la gestión de los residuos sólidos generados durante los procesos de extracción y clarificación, principalmente el bagazo y la cachaza.

El bagazo, un material fibroso que representa el 30% del peso procesado de la caña, y la cachaza, un subproducto rico en materia orgánica, suelen acumularse en grandes cantidades. La gestión inadecuada de

estos residuos puede derivar en problemas graves como contaminación del suelo y cuerpos de agua, emisión de gases de efecto invernadero y proliferación de vectores que afectan la salud pública. En contraste, cuando se gestionan de manera integral, estos residuos pueden convertirse en recursos valiosos para la generación de energía, fertilizantes y productos de valor agregado. Tal como señala García Culqui et al. (2023) el bagazo de caña de azúcar contiene proteína cruda que puede ser utilizada como fuente de proteína en la dieta animal.

En el marco de la transición hacia una economía circular, las agroindustrias tienen la oportunidad de adoptar estrategias innovadoras que promuevan la sostenibilidad ambiental y mejoren su competitividad. Sin embargo, esta transición implica una transformación significativa en el modo de producción y consumo, con un modelo económico que facilite la generación de valor de forma sustentable (Samaniego et al., 2022). Esta evolución debe atravesar una serie de sistemas vinculados, sincronizando los sistemas técnicos y biológicos con los modelos empresariales, el diseño, la innovación y los procesos de producción.

Tecnologías como la digestión anaerobia, el compostaje y la pirólisis permiten transformar estos residuos en energía renovable, fertilizantes orgánicos y materiales biodegradables. Según Angeles et al. (2021) es una tecnología amigable con el medio ambiente, ya que se desarrolla en ausencia de oxígeno y no emite gases de efecto invernadero causantes del cambio climático. En esta misma línea, Barzola et al. (2024) destacan que la digestión anaerobia es una opción más viable, si se consideran criterios ambientales, económicos y sociales.

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta retos técnicos, económicos y regulatorios que requieren soluciones específicas y un enfoque colaborativo entre el sector industrial, académico y gubernamental.

El objetivo de este artículo es analizar estrategias y tecnologías para la gestión integral de bagazo y cachaza en las agroindustrias azucareras, evaluando su impacto en la sostenibilidad ambiental y la economía circular. Además, se destacan casos de éxito que ilustran la aplicabilidad de estas estrategias y se discuten las barreras y oportunidades para su adopción en diferentes contextos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en este estudio combina un enfoque cualitativo y analítico, el cual, según Lecanda & Garrido (2003) se centra en comprender fenómenos sociales y humanos desde una perspectiva integral y subjetiva, priorizando la exploración de significados, experiencias y contextos específicos. Este enfoque busca interpretar la realidad a través de métodos como entrevistas, observación participante y análisis de textos, donde el investigador y los participantes en equipo construyen el conocimiento. A nivel analítico, descompone y categoriza los datos recopilados para identificar patrones, relaciones y temas emergentes, permitiendo una reconstrucción coherente del fenómeno estudiado. De esta manera, el análisis cualitativo se caracteriza por ser iterativo y contextual, adaptándose continuamente a las particularidades de la investigación.

Se basa en la revisión de literatura científica, análisis de casos de éxito y evaluación de tecnologías emergentes para la gestión integral de residuos sólidos en la agroindustria azucarera. Se describe a continuación el procedimiento metodológico adoptado:

Diagnóstico inicial de los residuos sólidos en las agroindustrias azucareras

El análisis inició con la caracterización de los principales residuos generados en las agroindustrias: el bagazo, que constituye el residuo fibroso derivado de la extracción del jugo de caña, y la cachaza, subproducto generado durante la clarificación del jugo. Se identificaron sus propiedades químicas, volúmenes de generación y potencial de valorización.

- a. Bagazo: Rico en celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que lo convierte en una fuente adecuada para la generación de energía y bioproductos.
- b. Cachaza: Con alto contenido de materia orgánica y nutrientes, ideal para su uso en compostaje y producción de biogás.

Identificación de tecnologías aplicadas

Se analizaron tecnologías avanzadas para la valorización de bagazo y cachaza, destacando su aplicabilidad y beneficios. Estas tecnologías se agruparon en tres categorías principales:

Valorización energética: Digestión anaerobia, pirólisis y gasificación para la producción de biogás, biochar y energía renovable.

- a. Aplicaciones agrícolas: Compostaje y uso directo como fertilizante orgánico.
- b. Producción de bioproductos: Transformación en bioplásticos, papel y otros materiales biodegradables.

Análisis de estudios de caso

Se seleccionaron casos de éxito de agroindustrias que han implementado tecnologías sostenibles para la gestión de bagazo y cachaza. Estos casos incluyeron industrias de Panamá, Brasil y México, y permitieron evaluar el impacto de las estrategias en términos de sostenibilidad ambiental, beneficios económicos y aceptación social.

Marco metodológico para la gestión integral

Se diseñó un marco metodológico integral basado en las etapas críticas del manejo de residuos:
Diagnóstico y evaluación inicial: Inventario de residuos generados y análisis de impacto ambiental.

- Planificación de estrategias: Selección de tecnologías adecuadas según el contexto local.
- Implementación: Instalación de infraestructura y capacitación del personal.
- Monitoreo y evaluación: Indicadores de desempeño ambiental y económico.
- Optimización continua: Incorporación de innovaciones tecnológicas y adaptación a normativas emergentes.

Fuentes de información y herramientas

La información recopilada se obtuvo de bases de datos científicas, informes técnicos de organismos internacionales y literatura académica reciente. Además, se utilizaron herramientas analíticas como estudios comparativos, indicadores de impacto ambiental y económico, y modelado de escenarios de gestión de residuos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Impacto ambiental de las estrategias implementadas

La implementación de tecnologías sostenibles para la gestión de bagazo y cachaza ha demostrado beneficios significativos en términos de reducción de emisiones, conservación de recursos y mejora de la calidad del suelo. En particular, las siguientes estrategias han generado resultados destacables:

- a. **Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):** La digestión anaerobia utilizada en cachaza ha permitido generar biogás y reducir las emisiones de metano provenientes de la descomposición no controlada.
- b. **Conservación del suelo y el agua:** El uso de compostaje ha mejorado la estructura y fertilidad del suelo, disminuyendo la dependencia de fertilizantes químicos.
- c. **Aprovechamiento de biomasa:** La pirólisis del bagazo ha generado biochar, utilizado como enmienda para retener nutrientes en suelos agrícolas.

En este punto es importante los señalamientos de García-Ramos et al. (2022) quienes indican que la gestión inadecuada de bagazo y cachaza puede resultar en la contaminación del suelo y cuerpos de agua. El desbordamiento de cachaza puede liberar nutrientes y contaminantes en el medio ambiente, afectando la calidad del agua.

De igual forma es importante destacar que una de las aplicaciones más prometedoras del bagazo es su utilización como fuente de energía renovable. La combustión del bagazo en calderas puede generar energía eléctrica, lo que reduce la dependencia de fuentes fósiles (López Meraz & Meraz, 2020). Además, la gasificación y la digestión anaeróbica son técnicas que permiten convertir el bagazo en biocombustibles (Zumalacárregui et al., 2015).

Tabla 1: estrategias propuestas para reducir el impacto ambiental

Estrategias	Beneficio ambiental	Indicador
Digestión anaerobia	Reducción de emisiones de GEI	35% en emisiones de CH ₄
Compostaje	Mejora de fertilidad del suelo	25% retención de agua
Pirólisis	Producción de biochar y captura de carbono	50 kg de CO ₂ eq capturados por tonelada

Beneficios económicos

La valorización del bagazo y la cachaza ha generado nuevas fuentes de ingreso para las agroindustrias y reducido los costos operativos:

- a. **Generación de energía renovable:** Plantas azucareras que utilizan bagazo como biomasa han logrado cubrir hasta el 70% de sus necesidades energéticas, reduciendo costos asociados al consumo de combustibles fósiles.
- b. **Producción de fertilizantes:** La venta de compost generado a partir de cachaza ha beneficiado a pequeños agricultores, mientras que las agroindustrias obtienen ingresos adicionales por su comercialización.

Tabla 2: Beneficios y fuente de ingresos

Fuente de ingreso	Producto generado	Incremento de ingresos (%)
Uso energético de bagazo	Electricidad y calor	+20% reducción de costos operativos
Compostaje de cachaza	Fertilizantes orgánicos	+15% ingresos por ventas agrícolas
Producción de bioproductos	Bioplásticos y biochar	+10% diversificación de ingresos

Casos de éxito

Caso 1: Azucarera La Victoria, Panamá

- Tecnología aplicada: digestión anaerobia y compostaje; los resultados muestran un 35% de reducción de emisiones de metano, generación de 5,000 toneladas anuales de compost orgánico y cobertura del 50% de la demanda energética de la planta con biogás.

Caso 2: Usina São Martinho, Brasil

- Tecnología aplicada: Pirólisis del bagazo y cogeneración de energía; los resultados destacan producción de 20 toneladas de biochar por día, disminución del 30% en la huella de carbono de la planta y exportación de energía al sistema eléctrico nacional.

Caso 3: Grupo Azucarero México (GAM), México

- **Bagazo como fuente de energía:** GAM ha implementado la cogeneración de energía utilizando bagazo de caña como fuente primaria de energía. Este proceso reduce la dependencia de combustibles fósiles, y al mismo tiempo, genera electricidad tanto para el propio funcionamiento de las fábricas como para la venta al sistema eléctrico nacional.
- **Producción de bioetanol y bioplásticos:** A partir del bagazo, la empresa ha desarrollado proyectos para obtener bioetanol como biocombustible, lo que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. También se están explorando aplicaciones del bagazo para producir bioplásticos, lo que representa un valor agregado importante para los residuos de la caña.

En la figura 1, se muestra una comparativa para tres tecnologías: digestión anaerobia, compostaje y pirólisis, se presenta una comparación de los beneficios ambientales y económicos derivados de tres estrategias principales implementadas en la gestión de residuos sólidos en las agroindustrias azucareras: digestión anaerobia, compostaje y pirólisis. Cada barra refleja el impacto porcentual relativo de estas tecnologías, medido en términos de reducción de emisiones, mejora del suelo, generación de energía renovable y diversificación de ingresos. Este enfoque visual permite identificar las fortalezas y limitaciones de cada estrategia en dos dimensiones clave: sostenibilidad ambiental y rentabilidad económica.

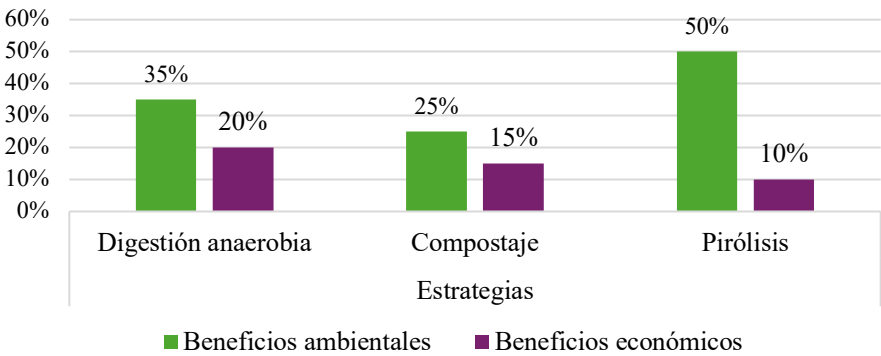


Fig. 1: Comparación de beneficios económicos y ambientales entre tecnologías aplicadas

La digestión anaerobia destaca por su notable impacto ambiental, con una reducción estimada del 35% en las emisiones de metano (CH₄), lo que la convierte en una herramienta clave para mitigar los gases de efecto invernadero. Además, su contribución económica es significativa, con un ahorro del 20% en costos energéticos gracias a la generación de biogás.

Al respecto Czekala et al., (2023) señala que la digestión anaerobia es reconocida por su capacidad para reducir emisiones de metano y generar biogás. Sin embargo, enfrenta obstáculos como altos costos de infraestructura y desafíos técnicos en el manejo de impurezas como el H₂S en el biogás. A pesar de esto, su flexibilidad para generar energía descentralizada la hace particularmente útil en zonas rurales.

Por otro lado, el compostaje muestra un desempeño balanceado, mejorando la capacidad del suelo para retener agua en un 25% y proporcionando un aumento del 15% en ingresos agrícolas mediante la venta de fertilizantes orgánicos. Finalmente, la pirólisis sobresale por su contribución ambiental, logrando capturar hasta 50 kg de CO₂ equivalente por tonelada de bagazo procesado. Sin embargo, su impacto económico es menor en comparación con las otras estrategias debido a los altos costos de implementación y operación inicial.

En este contexto Kavan & Panwar (2024) destacan que el compostaje se identifica como una opción económica y ecológica para la gestión de residuos biológicos, con especial énfasis en su capacidad para enriquecer el suelo y reducir desechos sólidos en vertederos. Sin embargo, su impacto en la mitigación de emisiones es inferior al de la digestión anaerobia.

En conjunto, los datos resaltan que ninguna estrategia es completamente superior en ambas dimensiones. Más bien, sugieren que una combinación de estas tecnologías, adaptada a las necesidades y capacidades de cada agroindustria, puede maximizar los beneficios globales y fomentar un enfoque sostenible en la gestión de residuos sólidos.

CONCLUSIÓN

Es fundamental evaluar el impacto medioambiental de los desechos sólidos producidos en las agroindustrias azucareras, particularmente el bagazo y la cachaza, para fomentar prácticas sostenibles y reducir el impacto ecológico de este sector. A partir del análisis realizado, se destacan las siguientes conclusiones:

Las tecnologías emergentes, como la digestión anaerobia, la pirólisis y el compostaje, han demostrado ser herramientas eficaces para convertir el bagazo y la cachaza en recursos útiles, como biogás, biochar y fertilizantes orgánicos. Estas prácticas no solo reducen los impactos ambientales, sino que también generan oportunidades económicas significativas para las agroindustrias.

La integración de estrategias de gestión sostenible promueve un modelo de economía circular en el que los residuos son reutilizados y reciclados para maximizar su valor. Esto fomenta la sostenibilidad económica y ambiental en la agroindustria azucarera.

La implementación de estas estrategias ha demostrado la capacidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, minimizar la contaminación del suelo y el agua, y mejorar la salud de los ecosistemas. Aunque las tecnologías son efectivas, la adopción enfrenta barreras como los altos costos iniciales, la falta de incentivos gubernamentales y la resistencia cultural en el sector. Superar estas barreras requiere políticas públicas más robustas, financiamiento adecuado y capacitación técnica para los actores involucrados.

La investigación y el desarrollo en tecnologías para la valorización de residuos sólidos, así como la colaboración entre instituciones académicas, gobiernos y el sector privado, son esenciales para ampliar la implementación de estas estrategias.

REFERENCIAS

- Angeles, W. G., López, R. Y. R., Rascón, J., Gurbillón, M. Á. B., Ramirez, C. M. O., Oliva, M., & Santillan, Y. M. (2021). Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirolisis. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.766>
- Barzola, M., Sánchez, E., & Coello, S. (2024). *Valoración energética de los residuos orgánicos (RSO) de la Parroquia Santa Clara en base a su caracterización fisicoquímica* [Tesis de ingeniería, Universidad de Guayaquil]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29700.74881>
- Czekala, W., Nowak, M., & Bojarski, W. (2023). Anaerobic Digestion and Composting as Methods of Bio-Waste Management. *Agricultural Engineering*, 27(1), 173-186. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0013>
- García Culqui, R., Jácome Pilco, C., Guevara Narváez, Lady, & Moreta Guangasi, T. (2023). Revalorización del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) como residuo importante para la agroindustria. 593 *Digital Publisher CEIT*, 8(3), 134-148. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9124152>

- García-Ramos, C. M., Quirós-Roque, V. A., & Rosales-Mendoza, L. E. (2022). Los residuos generados en la producción de la industria azucarera en los últimos 25 años. *Revista iberoamericana de bioeconomía y cambio climático*, 8(16), Article 16. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15041>
- Kavan, K., & Panwar, N. L. (2024). Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: A review. *Clean Energy*, 8(4), 61-78. <https://doi.org/10.1093/ce/zkae036>
- Lagos, E., & Castro, E. (2019). Caña de azúcar y subproductos de la agroindustria azucarera en la alimentación de rumiantes1. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 917-934. <https://www.redalyc.org/journal/437/43760145020/html/>
- Lecanda, R. Q., & Garrido, C. C. (2003). Introducción a la metodología de investigación cualitativa. *Revista de Psicodidáctica*, 14, 5-40.
- López Meraz, R. A. L., & Meraz, Ó. F. L. (2020). Ciencia, tecnología y energías renovables: Una aproximación a sus concepciones y contradicciones. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 15(45), 83-105. <https://www.redalyc.org/journal/924/92466105008/html/>
- Samaniego, J., Toro, E. R., Jiménez, J. H., & Santori, S. (2022). *Panorama de las hojas de ruta de economía circular en América Latina y el Caribe*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/037778b3-04da-4351-a558-3dded786ab50/content>
- Zumalacárregui, L. M., Pérez-Ones, O., Rodríguez-Ramos, P. A., Zumalacárregui-De Cárdenas, B. M., & Lombardi, G. (2015). Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(3), 407-418. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-77432015000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es