

Artículo de revisión

<https://doi.org/10.47460/minerva.v7i19.300>

## Valorización integral de la cachaza como recurso en la industria azucarera

Angel Jesus Bracamonte Sayaverde  
<https://orcid.org/0000-0001-5633-8658>  
p880912324@unitru.edu.pe  
Universidad Nacional de Trujillo  
Chiclayo, Perú

*Autor de correspondencia:* [p880912324@unitru.edu.pe](mailto:p880912324@unitru.edu.pe)

Recibido: (04/02/2026), Aceptado: (11/04/2026)

**Resumen.** La industria azucarera genera grandes volúmenes de cachaza, cuya disposición inadecuada produce impactos ambientales significativos, especialmente por la emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, este subproducto presenta un alto contenido de nutrientes esenciales y un considerable potencial energético que aún no ha sido plenamente aprovechado, debido a limitaciones técnicas y a la escasa implementación de tecnologías de valorización. La presente revisión bibliográfica analizó la producción, el manejo y las alternativas de aprovechamiento sostenible de la cachaza, a partir del examen de 39 fuentes científicas especializadas. La información se recopiló mediante una revisión sistemática y analítica de literatura indexada en bases de datos internacionales como *Scopus*, *ScienceDirect*, *SciELO* y *Web of Science*. Se priorizaron publicaciones entre 2020 y 2025. Los estudios abordaron propiedades fisicoquímicas, aplicaciones agronómicas y estrategias de valorización, como compostaje, biofertilizantes y aprovechamiento energético, aportando bases para un manejo sostenible.

**Palabras clave:** desperdicio agrícola, valoración de recursos, agroindustria, fertilizante.

### Comprehensive Valorization of Filter Cake as a Resource in the Sugar Industry

**Abstract.** The sugar industry generates large volumes of filter cake, whose inadequate disposal causes significant environmental impacts, especially through greenhouse gas emissions. However, this by-product has a high content of essential nutrients and considerable energy potential that has not yet been fully utilized, due to technical limitations and the limited implementation of valorization technologies. This literature review analyzed the production, management, and sustainable utilization alternatives for filter cake based on the examination of 39 specialized scientific sources. The information was collected through a systematic and analytical review of literature indexed in international databases such as *Scopus*, *ScienceDirect*, *SciELO*, and *Web of Science*. Publications from 2020 to 2025 were prioritized. The studies addressed physicochemical properties, agronomic applications, and valorization strategies, such as composting, biofertilizers, and energy recovery, providing a basis for sustainable management.

**Keywords:** agricultural waste, resource valorization, agroindustry, fertilizer.



## I. INTRODUCCIÓN

La cachaza se genera como un subproducto sólido en la industria azucarera durante la etapa de clarificación del jugo de caña, proceso en el cual las impurezas insolubles son removidas mediante floculación y posterior filtración al vacío [1]. Su acumulación sin un tratamiento adecuado constituye un desafío ambiental relevante, ya que su descomposición anaeróbica produce gases de efecto invernadero, como metano y dióxido de carbono, contribuyendo al cambio climático y afectando negativamente los ecosistemas circundantes [2].

No obstante, la cachaza posee un alto valor potencial debido a su composición rica en nutrientes esenciales, tales como calcio, potasio, fósforo y nitrógeno, así como micronutrientes como zinc y boro. Además, presenta características fisicoquímicas favorables, incluyendo una relación C/N de 32,6, un contenido de carbono del 28,73% y aproximadamente un 70% de humedad, lo que la posiciona como una enmienda orgánica eficaz para la mejora de la calidad del suelo [3]. En este contexto, su aprovechamiento se perfila como una estrategia clave dentro de los sistemas agrícolas sostenibles.

En términos de valorización, la cachaza puede ser aprovechada a través de diversas rutas. En el ámbito alimenticio, se ha explorado su uso como suplemento para la alimentación animal, particularmente por su contenido de fibra y materia orgánica, aunque su aplicación requiere un manejo adecuado para evitar riesgos sanitarios. Por su parte, en la agroindustria, destaca su contenido de ceras (7–10% en base seca), utilizadas en la elaboración de productos cosméticos, farmacéuticos y recubrimientos [4]. Asimismo, contiene compuestos de alto valor, como alcoholes grasos y fitoesteroles con propiedades antioxidantes, cuya extracción ha sido objeto de investigación mediante métodos sostenibles [5]. Adicionalmente, el aceite derivado de la cachaza puede ser transformado en biodiésel, ampliando sus posibilidades de aprovechamiento energético [6], [7].

Desde la perspectiva energética, la digestión anaeróbica de la cachaza permite la producción de biogás, con rendimientos reportados entre 260 y 280 NmL de metano por gramo de materia seca. Sin embargo, la presencia de compuestos lignificados limita su eficiencia, lo que ha impulsado el desarrollo de estrategias como pretratamientos y procesos de codigestión para optimizar la producción [8]. De igual manera, se han investigado alternativas como la combustión directa y la fabricación de biocombustibles sólidos, incluyendo pellets con un poder calorífico aproximado de 12 210 kJ/kg y eficiencias térmicas superiores al 90% [9], [10].

Estas estrategias evidencian el potencial de la cachaza para su integración en modelos de economía circular, generando beneficios ambientales, económicos y sociales en la agroindustria azucarera. En este marco, la presente revisión bibliográfica tiene como objetivo analizar las tecnologías y aplicaciones actuales para la valorización de la cachaza, identificando tanto oportunidades como desafíos para su implementación sostenible.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Características de la cachaza

La cachaza, también conocida en la literatura internacional como *filter cake* o *press mud*, constituye un residuo sólido heterogéneo generado durante el proceso de clarificación del jugo de caña en la industria azucarera. Este subproducto se caracteriza por su naturaleza coloidal y su estructura esponjosa, con tonalidades que varían entre marrón oscuro y negro, lo que le confiere una elevada capacidad de retención de agua y una notable plasticidad en condiciones húmedas [9]. Desde el punto de vista físico, presenta una alta humedad, generalmente en el rango de 65% a 75%, así como una textura fina y parcialmente fibrosa, producto de la combinación de compuestos orgánicos, partículas minerales y residuos vegetales derivados del procesamiento de la caña [9], [11].

En términos químicos, la cachaza se distingue por su elevado contenido de materia orgánica y su riqueza en nutrientes esenciales, lo que la convierte en un material de interés para diversas aplicaciones. Diversos estudios reportan la presencia de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, así como micronutrientes como zinc, hierro y boro, cuya concentración puede variar en función del origen geográfico de la caña y de las condiciones del proceso industrial [1], [2], [3], [5]. Asimismo, presenta una relación carbono-nitrógeno relativamente alta, lo que influye directamente en su comportamiento durante procesos biológicos como el compostaje y la digestión anaerobia. Adicionalmente, la cachaza contiene compuestos de naturaleza lipídica, incluyendo ceras, alcoholes grasos y fitoesteroles, los cuales

han sido objeto de interés en procesos de extracción para la obtención de productos de valor agregado [12], [13].

Desde una perspectiva funcional, estas características fisicoquímicas confieren a la cachaza una notable versatilidad como materia prima en distintos procesos de valorización. Su alto contenido de materia orgánica y su biodegradabilidad favorecen su uso en aplicaciones agrícolas, mejorando la estructura del suelo, la retención de humedad y la actividad microbiológica [2], [5]. De igual manera, su composición rica en carbono y compuestos fermentables la convierte en un sustrato adecuado para procesos de conversión energética, como la digestión anaerobia para la producción de biogás [6], [7], [8]. Por otro lado, la presencia de compuestos lignocelulósicos y minerales permite su incorporación en matrices de materiales compuestos, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles en el ámbito de la construcción y la ingeniería de materiales [14], [15], [16], [17].

De esta manera, la cachaza puede ser entendida no solo como un residuo agroindustrial, sino como una biomasa compleja con propiedades estructurales, químicas y funcionales que sustentan su potencial de valorización en múltiples cadenas productivas. Esta caracterización integral resulta fundamental para comprender las diferentes rutas de aprovechamiento abordadas en la literatura, así como para justificar su inclusión dentro de estrategias de economía circular orientadas a la sostenibilidad del sector azucarero.

#### B. Rutas de valorización de la cachaza en la agroindustria

La cachaza constituye un subproducto sólido generado en la industria azucarera durante la etapa de clarificación del jugo de caña, proceso en el cual el jugo extraído en la molienda, caracterizado por su naturaleza ácida, con un pH aproximado de 5,2, es tratado con lechada de cal para favorecer la neutralización, reducir las pérdidas de sacarosa y promover la precipitación de impurezas orgánicas e inorgánicas [14]. A partir de los sedimentos formados por floculación, este material es separado mediante filtración al vacío, dando origen a un residuo de aspecto esponjoso y amorfo, con tonalidades que varían entre marrón oscuro y negro, y con una elevada capacidad de retención de agua [1]. Desde el punto de vista composicional, la cachaza presenta una notable riqueza nutricional, con contenidos promedio de 1,32% de nitrógeno, 1,99% de fósforo y 0,67% de potasio, además de micronutrientes como zinc (113 mg/kg) y boro (24 mg/kg). Asimismo, exhibe una relación carbono-nitrógeno de 32,6, un contenido de carbono total del 28,73% y una humedad cercana al 70% [3], lo que la posiciona como un recurso de alto potencial para aplicaciones biotecnológicas, agroindustriales y energéticas.

En el ámbito agrícola, la cachaza ha sido ampliamente estudiada como enmienda orgánica debido a su capacidad para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Su aplicación puede realizarse de forma directa o mediante procesos controlados de compostaje, los cuales permiten estabilizar la materia orgánica y optimizar la disponibilidad de nutrientes [15]. En este sentido, diversos estudios han evidenciado que el compost derivado de cachaza contribuye a mejorar la estructura del suelo, incrementar la retención de humedad y estimular la actividad microbiana beneficiosa para los cultivos [14]. No obstante, a pesar de estos beneficios, la gestión inadecuada de grandes volúmenes de cachaza representa un problema ambiental significativo, ya que su descomposición natural genera lixiviados ácidos que pueden afectar la calidad del suelo y de las aguas subterráneas, además de emitir gases que intensifican el calentamiento global [16], [11]. Este escenario pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias sostenibles de manejo que permitan maximizar sus beneficios y minimizar sus impactos negativos.

Paralelamente, la valorización de la cachaza en la alimentación animal ha emergido como una alternativa complementaria dentro de los esquemas de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales. En este contexto, su incorporación en dietas pecuarias, generalmente en combinación con otros subproductos, ha demostrado resultados favorables en términos de aporte nutricional. La cachaza presenta aproximadamente un 87,3% de materia seca, 11,18% de proteína cruda, 33,94 % de fibra cruda, 12,25% de cenizas y un valor energético metabolizable de 358,59 kcal/100 g, además de contenidos relevantes de calcio (1,75%) y fósforo (0,32%). Estudios de digestibilidad *in vitro* han reportado valores superiores al 65 %, lo que evidencia su viabilidad como insumo alimenticio, contribuyendo simultáneamente a la reducción de residuos y al fortalecimiento de la economía circular en la cadena productiva azucarera.

Desde la perspectiva energética, la cachaza se reconoce como una fuente importante de biomasa debido a su alto contenido de materia orgánica y sólidos suspendidos. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, este residuo posee un valor energético considerable que puede ser aprovechado mediante diversas tecnologías, entre ellas la digestión anaeróbica, la combustión directa

y la producción de biocombustibles sólidos [18]. En particular, la digestión anaeróbica permite la generación de biogás como fuente de energía renovable, mientras que la transformación en pellets o briquetas facilita su uso como combustible sólido. Adicionalmente, la cachaza se caracteriza por presentar partículas finas de color marrón oscuro y un contenido de humedad que oscila entre el 65% y el 75% [9], [12], lo que influye directamente en su comportamiento durante los procesos de conversión energética.

Estos enfoques evidencian que la cachaza no debe ser considerada únicamente como un residuo, sino como un recurso estratégico dentro de los principios de la economía circular y la bioeconomía. Su aprovechamiento integral permite no solo mitigar impactos ambientales asociados a su disposición inadecuada, sino también generar valor agregado en distintos sectores productivos, consolidando su papel como un insumo clave en la transición hacia sistemas agroindustriales más sostenibles.

### III. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de tipo documental, siguiendo los lineamientos establecidos por la declaración PRISMA 2020, con el propósito de garantizar un proceso sistemático, transparente y replicable en la identificación, selección y análisis de la literatura científica. La investigación se orientó a examinar las alternativas tecnológicas para la valorización de la cachaza generada en la industria azucarera, considerando su contribución a la sostenibilidad ambiental y su integración en modelos de economía circular. En este sentido, se planteó como pregunta de investigación: ¿qué alternativas tecnológicas para la valorización de la cachaza han sido reportadas en la literatura científica reciente (2020–2025) y de qué manera contribuyen a la sostenibilidad del sector azucarero?

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas de reconocido prestigio internacional, entre las que se incluyen *Web of Science*, *Scopus*, *ScienceDirect*, *SciELO*, *SpringerLink*, *Wiley Online Library*, *Taylor & Francis* y *EBSCO*. Se priorizaron artículos científicos publicados en idioma inglés y español durante el periodo 2020–2025, con el fin de asegurar la actualidad y pertinencia de la información analizada. La estrategia de búsqueda se estructuró mediante el uso de descriptores clave relacionados con “cachaza”, “*filter cake*”, “*press mud*” y “*sugarcane residues*”, combinados con términos asociados a valorización, sostenibilidad, bioenergía, compostaje y alimentación animal. No se detallan ecuaciones específicas debido a su variabilidad entre plataformas, priorizándose la coherencia semántica y la pertinencia temática de los resultados obtenidos.

Los criterios de inclusión consideraron artículos científicos originales con evidencia empírica, ya sea con datos primarios o secundarios, que abordaran la valorización de la cachaza desde perspectivas agrícolas, energéticas o alimentarias. Asimismo, se incluyeron estudios relacionados con sostenibilidad y economía circular en el contexto agroindustrial. Por el contrario, se excluyeron documentos sin acceso a texto completo, publicaciones en idiomas distintos al español o inglés, estudios sin enfoque directo en la cachaza, así como aquellos que presentaban debilidades metodológicas o resultados no verificables.

El proceso de selección de los estudios se llevó a cabo conforme al flujo PRISMA, el cual comprende las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión. Inicialmente, se identificaron los registros provenientes de las bases de datos seleccionadas; posteriormente, se eliminaron los duplicados y se realizó un primer filtrado por título y resumen. Finalmente, los artículos potencialmente relevantes fueron evaluados a texto completo para determinar su inclusión definitiva en el análisis. A continuación, se presenta el resumen del proceso de selección de estudios (Tabla 1), el cual evidencia la reducción progresiva del número de documentos hasta la obtención de la muestra final analizada.

**Tabla 1.** Selección de estudios según el protocolo PRISMA.

Fase PRISMA	Nro de artículos	Descripción
Identificación	133	Registros iniciales obtenidos de las bases de datos
Cribado	70	Tras eliminación de duplicados y exclusión por título y resumen
Elegibilidad	39	Artículos evaluados a texto completo y seleccionados para el análisis final

Fuente: *Elaboración propia.*

Una vez definidos los estudios incluidos, se procedió a la extracción sistemática de información relevante, considerando variables como el diseño metodológico, la ruta de valorización evaluada (agrícola, alimentaria o energética), la composición fisicoquímica de la cachaza, las tecnologías de transformación empleadas (compostaje, digestión anaerobia, transesterificación, peletización), así como los rendimientos y eficiencias reportadas. Adicionalmente, se analizaron las estrategias de sostenibilidad y los enfoques de economía circular propuestos en cada estudio.

El análisis de la información se desarrolló mediante una síntesis narrativa, organizando los hallazgos en función de las principales rutas de valorización identificadas. Este enfoque permitió comparar resultados entre estudios, identificar convergencias y divergencias en términos de desempeño tecnológico, así como reconocer limitaciones técnicas y oportunidades de implementación en el contexto de la agroindustria azucarera.

Para la gestión de referencias y control de duplicados, los registros bibliográficos fueron exportados en formato CSV y organizados mediante Microsoft Excel. La identificación de duplicados se realizó inicialmente de forma automatizada, seguida de una verificación manual exhaustiva para asegurar la depuración completa de la base de datos.

En cuanto a las limitaciones metodológicas, se identificó una alta heterogeneidad en los diseños experimentales y en las condiciones de evaluación reportadas en la literatura, lo cual dificultó la comparación directa de resultados, especialmente en términos de rendimientos energéticos y eficiencia de procesos. Asimismo, se observó una variabilidad significativa en la composición fisicoquímica de la cachaza, influenciada por factores geográficos y tecnológicos propios de cada contexto productivo. Finalmente, se evidenció una limitada disponibilidad de estudios orientados a la evaluación económica a escala industrial, predominando investigaciones a nivel de laboratorio o piloto.

Este diseño metodológico permitió desarrollar un análisis riguroso, estructurado y coherente, proporcionando una visión integral sobre las alternativas de valorización sostenible de la cachaza y su potencial contribución al desarrollo de sistemas agroindustriales más eficientes y ambientalmente responsables.

## IV. RESULTADOS

El análisis de los 39 estudios seleccionados permitió identificar cuatro clústeres principales de valorización de la cachaza, los cuales no solo responden a enfoques tecnológicos diferenciados, sino que evidencian distintos niveles de madurez y aplicabilidad dentro de la economía circular del sector azucarero. En términos generales, los resultados muestran una transición progresiva desde enfoques tradicionales (uso agrícola) hacia aplicaciones de mayor valor agregado (energía y materiales avanzados), lo que confirma una evolución tecnológica en la gestión de este residuo.

### A. Identificación de clústeres de valorización

El análisis permitió agrupar la literatura en cuatro clústeres estratégicos:

- Clúster agrícola (dominante): enfocado en fertilidad del suelo.
- Clúster energético (en expansión): producción de biogás y biodiesel.
- Clúster de materiales (emergente): biocompuestos y construcción.
- Clúster integral (avanzado): economía circular y biorrefinerías.

En la Tabla 2 se presenta la sistematización de estos clústeres.

**Tabla 2.** Clasificación relevante en la bibliografía analizada.

Clúster	Enfoque	Tecnologías	Referencias
Agrícola	Fertilidad del suelo	Compostaje, aplicación directa	[1], [2], [3], [5], [10]
Energético	Producción de biogás/biodiesel	Digestión anaerobia, codigestión	[6], [7], [8], [12]
Materiales	Biocompuestos	Cemento, polímeros	[14], [15], [16], [17]
Integral	Economía circular	Valorización múltiple	[4], [11], [19], [20]

*Fuente: Elaboración propia.*

*Clúster agrícola: alta efectividad, baja innovación*

Los estudios evidencian que la aplicación de cachaza mejora significativamente la fertilidad del suelo, incrementando la biomasa vegetal y la actividad microbiana [1], [2], [5]. Asimismo, el compostaje optimiza la estabilidad del material y su eficiencia agronómica [10].

Sin embargo, este clúster presenta limitaciones estructurales, ya que no maximiza el valor económico del residuo, depende de condiciones locales (suelo, clima) y tiene baja escalabilidad industrial. Sin embargo, este hallazgo es clave, porque es el uso más difundido, pero no el más eficiente desde una perspectiva de valorización integral.

*Clúster energético: mayor potencial de escalamiento*

La digestión anaerobia y la codigestión muestran rendimientos consistentes en producción de metano, con mejoras significativas cuando se aplican pretratamientos alcalinos o combinaciones con otros residuos [6], [7], [8]. Además, se identifican beneficios ambientales y económicos simultáneos, se reduce la carga contaminante del residuo y se integra fácilmente en esquemas industriales. Este clúster presenta el mayor potencial para transición energética, aunque requiere optimización tecnológica.

*Clúster de materiales: innovación disruptiva*

Un grupo emergente de estudios propone el uso de cachaza en cemento y materiales de construcción [14], así como en biocompuestos poliméricos [15], [16], [17].

Estos enfoques destacan por generar productos de alto valor agregado, reducir el uso de materiales convencionales e integrarse en economías verdes. Este hallazgo es relevante porque, aunque aún incipiente, este clúster representa la línea más innovadora de valorización.

*Clúster integral: enfoque de economía circular*

Los estudios más recientes plantean modelos integrados donde la cachaza es utilizada simultáneamente para energía, agricultura y producción de compuestos bioactivos. Esto se alinea con enfoques de biorrefinería y sostenibilidad global [4], [11], [19], [20]. Este clúster representa el estado del arte, pero aún con baja implementación real.

*B. Hallazgo emergente*

A partir del análisis cruzado, se identificó un patrón clave: existe una relación inversa entre nivel de innovación y grado de implementación. Este patrón puede describirse como:

- Aplicaciones tradicionales (agrícolas) → alta adopción, bajo valor agregado.
- Aplicaciones avanzadas (materiales, energía) → alto valor, baja implementación.

Esto revela una brecha tecnológica crítica, que limita la transición hacia modelos de economía circular.

Los resultados demuestran que la cachaza ha evolucionado de ser un residuo problemático a un recurso estratégico con múltiples rutas de valorización. No obstante, la evidencia científica indica que su aprovechamiento aún se encuentra fragmentado, predominando enfoques aislados en lugar de

sistemas integrados. En este sentido, el principal desafío identificado no es tecnológico, sino de integración y escalamiento, lo que abre oportunidades para el desarrollo de modelos híbridos que combinen simultáneamente valorización agrícola, energética y material.

La Figura 1 presenta el mapa de clústeres de valorización de la cachaza, construido a partir del análisis sistemático de la literatura científica seleccionada. Esta representación sintetiza las principales líneas de investigación identificadas en los estudios revisados, permitiendo visualizar de manera integrada las rutas predominantes de aprovechamiento de este residuo agroindustrial. En particular, la revisión sistemática evidenció la existencia de cuatro clústeres claramente diferenciados: aplicaciones agrícolas, valorización energética, desarrollo de materiales y enfoques integrales basados en economía circular.

La organización de estos clústeres responde tanto a la naturaleza de las tecnologías empleadas como al nivel de madurez y grado de implementación reportado en los estudios analizados. De este modo, la figura no solo permite comprender la diversidad de enfoques existentes, sino que también facilita la identificación de tendencias emergentes y vacíos en la investigación, constituyéndose en una herramienta analítica clave para interpretar la evolución del campo de estudio.



Fig. 1. Mapa de clústeres de valorización de la cachaza.

La Figura 2 ilustra las principales rutas tecnológicas de valorización de la cachaza identificadas a partir de la revisión sistemática de la literatura. Esta representación permite integrar de manera estructurada los diferentes procesos de transformación reportados en los estudios analizados, evidenciando la diversidad de enfoques utilizados para el aprovechamiento de este residuo agroindustrial.

En particular, se destacan las rutas asociadas al compostaje y uso agrícola, la digestión anaerobia para la producción de biogás, la extracción y transformación para la obtención de biocombustibles, así como la conversión en materiales y bioproductos de mayor valor agregado. La organización de estas rutas responde a los distintos niveles de complejidad tecnológica y a los objetivos de valorización identificados en la literatura. De este modo, la figura sintetiza los principales procesos involucrados en la transformación de la cachaza, permitiendo visualizar las interrelaciones entre ellos y facilitando la comprensión de su potencial dentro de esquemas de aprovechamiento sostenible y economía circular.



Fig. 2. Diagrama de rutas tecnológicas de valorización.

La Figura 3 presenta la matriz de impacto frente a madurez tecnológica de las principales rutas de valorización de la cachaza, construida a partir del análisis comparativo de los estudios incluidos en la revisión sistemática. Esta representación permite evaluar de manera integrada el grado de desarrollo y el potencial de impacto de cada enfoque identificado en la literatura.

Los resultados evidencian que las aplicaciones agrícolas se ubican en un nivel alto de madurez tecnológica, debido a su amplia adopción y validación empírica, aunque con un impacto limitado en términos de generación de valor agregado. En contraste, las aplicaciones en materiales avanzados presentan un alto potencial de impacto, pero aún se encuentran en etapas tempranas de desarrollo. Por su parte, la valorización energética ocupa una posición intermedia, reflejando un equilibrio entre viabilidad tecnológica y potencial de escalamiento. Finalmente, los enfoques integrales basados en economía circular se posicionan como el escenario óptimo, al combinar niveles elevados de impacto y madurez, aunque su implementación aún es incipiente.

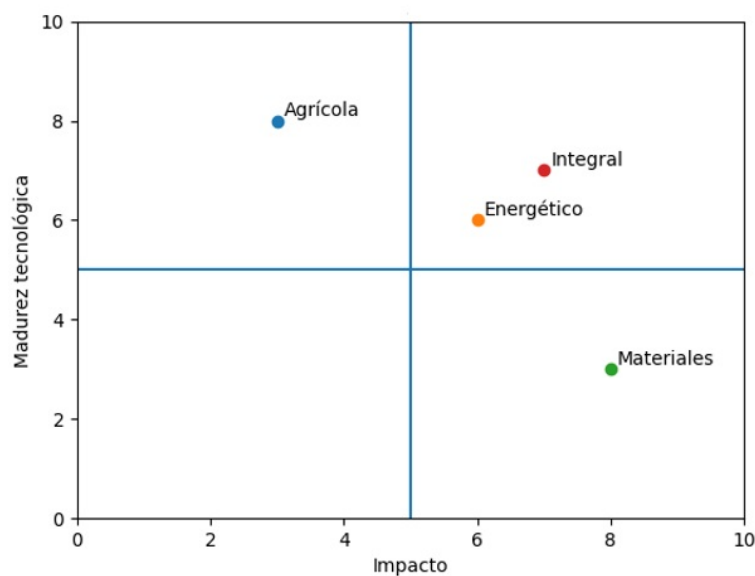


Fig. 3. Relación entre nivel de innovación y grado de implementación de las tecnologías de valorización de la cachaza, derivada de la revisión sistemática.

Esta matriz constituye un aporte analítico derivado de la revisión sistemática, al permitir identificar brechas tecnológicas y orientar futuras líneas de investigación hacia modelos de valorización más integrados y sostenibles.

### C. *Discusión de resultados*

Los resultados obtenidos a partir de la revisión sistemática evidencian que la valorización de la cachaza ha evolucionado desde aplicaciones convencionales hacia enfoques más complejos e integrados. En particular, los estudios centrados en el uso agrícola continúan siendo predominantes, debido a la facilidad de implementación y a los beneficios comprobados sobre la fertilidad del suelo y la productividad agrícola [1], [2], [3], [5]. Sin embargo, estos enfoques presentan limitaciones en términos de generación de valor agregado, lo que restringe su impacto dentro de esquemas avanzados de economía circular.

En contraste, las aplicaciones energéticas han mostrado un crecimiento significativo en la literatura reciente, destacándose la digestión anaerobia y la codigestión como tecnologías eficientes para la producción de biogás [6], [7]. La incorporación de pretratamientos ha permitido superar barreras asociadas a la lignificación del material, mejorando los rendimientos de metano [8]. Estos hallazgos sugieren que la valorización energética constituye una alternativa viable para la transición hacia sistemas productivos más sostenibles, al integrar beneficios ambientales y económicos.

Por otra parte, los estudios relacionados con el desarrollo de materiales avanzados representan una línea emergente con alto potencial innovador. La incorporación de cachaza en matrices cementicias y compuestos poliméricos ha demostrado mejoras en propiedades mecánicas y sostenibilidad de materiales [14], [15], [16], [17]. No obstante, su implementación a escala industrial aún es limitada, lo que evidencia una brecha entre investigación y aplicación práctica.

Adicionalmente, investigaciones recientes han propuesto enfoques integrales basados en principios de economía circular, en los cuales la cachaza es valorizada simultáneamente en múltiples cadenas productivas [4], [11], [20], [17]. Estos modelos permiten maximizar el aprovechamiento del residuo, aunque su adopción requiere un mayor desarrollo tecnológico y coordinación intersectorial.

La revisión sistemática revela que el principal desafío no radica en la disponibilidad de tecnologías, sino en su integración y escalamiento. Existe una tendencia clara hacia la diversificación de aplicaciones, pero aún predomina un enfoque fragmentado que limita el potencial real de la cachaza como recurso estratégico.

## CONCLUSIONES

La presente revisión permitió evidenciar que la cachaza ha dejado de ser considerada únicamente un residuo problemático de la industria azucarera para consolidarse como un recurso estratégico con múltiples posibilidades de valorización. A partir del análisis de la literatura científica reciente, se identificó una diversificación progresiva de enfoques tecnológicos que abarcan desde aplicaciones agrícolas tradicionales hasta desarrollos avanzados en el ámbito energético y de materiales.

No obstante, los resultados ponen de manifiesto una marcada asimetría entre el grado de madurez tecnológica y el nivel de impacto potencial de las distintas rutas de valorización. Mientras que las aplicaciones agrícolas presentan altos niveles de implementación y validación empírica, su capacidad para generar valor agregado es limitada. En contraste, las aplicaciones en materiales y bioproductos muestran un elevado potencial innovador, aunque aún enfrentan barreras significativas para su escalamiento industrial. Esta brecha evidencia que el principal desafío actual no radica en la disponibilidad de alternativas tecnológicas, sino en su integración efectiva dentro de sistemas productivos sostenibles.

Asimismo, la valorización energética surge como una alternativa intermedia con alto potencial de consolidación, especialmente mediante procesos de digestión anaerobia y codigestión, los cuales permiten simultáneamente la generación de energía renovable y la reducción del impacto ambiental. Sin embargo, su implementación a gran escala aún requiere optimización de procesos y adaptación a contextos productivos específicos.

Un hallazgo relevante de esta revisión es la creciente tendencia hacia enfoques integrales basados en principios de economía circular, en los cuales la cachaza es concebida como un insumo multifuncional dentro de sistemas de biorrefinería. Estos modelos representan el escenario más prometedor para maximizar el aprovechamiento del residuo, aunque su adopción todavía es incipiente y demanda mayores niveles de articulación entre investigación, industria y políticas públicas.

En este sentido, se puede afirmar que el futuro de la valorización de la cachaza depende de la transición desde enfoques fragmentados hacia modelos integrados y multiescala, capaces de combinar simultáneamente beneficios ambientales, económicos y sociales. Para ello, resulta imprescindible fortalecer la investigación aplicada orientada al escalamiento tecnológico, así como promover marcos regulatorios y estrategias de innovación que faciliten la implementación de soluciones sostenibles en la agroindustria azucarera.

Finalmente, esta revisión sistemática no solo sintetiza el estado actual del conocimiento, sino que también identifica brechas críticas y oportunidades de desarrollo, constituyéndose en una base sólida para futuras investigaciones y para la formulación de estrategias que impulsen una gestión más eficiente y sostenible de los residuos agroindustriales.

## REFERENCIAS

- [1] N. P. S. Yaduvanshi and D. V. Yadav, "Effects of sulphitation press mud and nitrogen fertilizer on biomass, nitrogen economy and plant composition in sugarcane and on soil chemical properties," *The Journal of Agricultural Science*, vol. 114, no. 3, pp. 259–263, 1990, doi: 10.1017/S0021859600072646.
- [2] S. D. Yang, J. X. Liu, J. Wu *et al.*, "Effects of vinasse and press mud application on the biological properties of soils and productivity of sugarcane," *Sugar Tech*, vol. 15, no. 2, pp. 152–158, 2013, doi: 10.1007/s12355-012-0200-y.
- [3] M. Prasad, "Response of sugarcane to filter press mud and n, p, and k fertilizers. ii. Effects on plant composition and soil chemical properties," *Agronomy Journal*, vol. 68, no. 4, pp. 543–547, 1976, doi: 10.2134/agronj1976.00021962006800040003x.
- [4] A. Arulazhagan, G. Muthaiyan, S. Murugaiyan *et al.*, "Press mud: A promising resource for green energy production as fertilizer, fuel and feed," *Sugar Tech*, vol. 26, pp. 1078–1087, 2024, doi: 10.1007/s12355-024-01465-2.
- [5] L. L. Campiteli, R. M. Santos, G. Lazarovits, and E. C. Rigobelo, "The impact of applications of sugar cane filter cake and vinasse on soil fertility factors in fields having four different crop rotation practices in Brazil," *Científica*, vol. 46, no. 1, pp. 42–48, 2018, doi: 10.15361/1984-5529.2018v46n1p42-48.
- [6] L. M. López González, I. Pereda Reyes, J. Pedraza Garciga, E. L. Barrera, and O. Romero Romero, "Energetic, economic and environmental assessment for the anaerobic digestion of pretreated and codigested press mud," *Waste Management*, vol. 102, pp. 249–259, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.053.
- [7] W. Wongarmat, A. Reungsang, S. Sittijunda *et al.*, "Anaerobic co-digestion of biogas effluent and sugarcane filter cake for methane production," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 12, pp. 901–912, 2022, doi: 10.1007/s13399-021-01305-3.
- [8] Z. Talha, W. Ding, E. Mehryar, M. Hassan, and J. Bi, "Alkaline pretreatment of sugarcane bagasse and filter mud codigested to improve biomethane production," *BioMed Research International*, vol. 2016, p. 8650597, 2016, art. no. 8650597. doi: 10.1155/2016/8650597.
- [9] M. Patel and R. Gill, "An overview of press-mud and its unique characteristics," *Krishinetra*, vol. 1, no. 1, pp. 62–64, 2023.
- [10] R. Kumar, D. Verma, B. L. Singh, U. Kumar, and Shweta, "Composting of sugarcane waste by-products through treatment with microorganisms and subsequent vermicomposting," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 17, pp. 6707–6711, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.111.
- [11] V. Poria, P. Jhiltia, A. Rana, J. Khokhar, and S. Singh, "Pressmud: A sustainable source of value-added products," *Environmental Technology Reviews*, vol. 11, no. 1, pp. 187–201, 2022, doi: 10.1080/21622515.2022.2144767.

- [12] L. Casas, Y. Hernández, C. Mantell, N. Casdelo, and E. Martínez de la Ossa, "Filter cake oil-wax as raw material for the production of biodiesel: Analysis of the extraction process and the transesterification reaction," *Journal of Chemistry*, vol. 2015, p. 946462, 2015, art. no. 946462. doi: 10.1155/2015/946462.
- [13] N. T. Thao and H. Q. Tuan, "Recovering bioactive compounds from cane sugar wastes," in *Recovering Bioactive Compounds from Agricultural Wastes*, V. T. Nguyen, Ed. Wiley, 2017, doi: 10.1002/9781119168850.ch7.
- [14] M. K. H. Radwan, K. H. Mo, C. C. Onn, C. G. Ng, and T.-C. Ling, "Waste press mud in enhancing the performance of glass powder blended cement," *Construction and Building Materials*, vol. 313, p. 125469, 2021, art. no. 125469. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125469.
- [15] C. G. da Silva and E. Frollini, "Unburned sugarcane bagasse: Bio-based phenolic thermoset composites as an alternative for the management of this agrowaste," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, pp. 3201–3210, 2020, doi: 10.1007/s10924-020-01848-y.
- [16] F. Ortega, F. Versino, O. V. López *et al.*, "Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products," *Emergent Materials*, vol. 5, pp. 873–921, 2022, doi: 10.1007/s42247-021-00319-x.
- [17] D. Ochi, D. Barbieri, A. F. Reis, P. Severino, A. C. Venturini, C. M. P. Yoshida, E. B. Souto, and C. F. da Silva, "Agro-industrial waste as fillers for green composites," in *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*, I. Inamuddin, T. Altalhi, and A. Alrooqi, Eds. Elsevier, 2023, pp. 1–26, doi: 10.1016/B978-0-323-95183-8.00013-5.
- [18] T. S. T. Ibrahim and T. S. Workneh, "The environmental impact of the sugar industry waste in Sudan," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 195, p. 870, 2023, art. no. 870. doi: 10.1007/s10661-023-11401-8.
- [19] T. Temesgen, S. Periyasamy, D. Mensur, B. Berhane, S. Sunaina, and M. Jayakumar, "Valorization of wastes and by-products of cane-based sugar industry," in *Value Added Products From Food Waste*, E. Cherian and B. Gurunathan, Eds. Springer, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-48143-7\_10.
- [20] M. Meghana and Y. Shastri, "Sustainable valorization of sugar industry waste: Status, opportunities, and challenges," *Bioresource Technology*, vol. 303, p. 122929, 2020, art. no. 122929. doi: 10.1016/j.biortech.2020.122929.