



Caracterización microbiana del compost elaborado con fibra de caña de azúcar como estrategia sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales: Una revisión sistemática.

Autores

**Diego Fernando Grueso Rúaless
Yessenia Restrepo García**

**Título por el que se opta
Microbiólogo**

Director

Alexis Gafaro Montejo.

**Grupo de investigación
GIMIA**

**Línea de investigación
Microbiología ambiental**

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Programa de Microbiología
Cali, Colombia
2026.**

IMPACTOS

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Científico	Artículo de revisión sistemática que recopila, analiza y sintetiza la información científica disponible sobre la diversidad microbiana presente en el compost elaborado a partir de fibra de caña de azúcar, identificando especies predominantes, condiciones óptimas para su actividad y factores que afectan la calidad del compost. Este producto aportará evidencia sólida para mejorar los procesos de compostaje y orientar futuras investigaciones en microbiología aplicada a la gestión de residuos agroindustriales.	Investigadores en microbiología agrícola, docentes y estudiantes de carreras agropecuarias y ambientales, profesionales del sector azucarero, entidades de investigación en biotecnología y sostenibilidad agrícola.
Tecnológico	Documento técnico con lineamientos preliminares derivados de la revisión sistemática, enfocados en la optimización del compostaje de fibra de caña mediante el control de comunidades microbianas y parámetros críticos del proceso. Este insumo puede servir de base para el desarrollo de protocolos estandarizados y tecnologías aplicadas al manejo de residuos agroindustriales.	Ingenieros agrónomos, tecnólogos en procesos agroindustriales, centros de investigación y desarrollo tecnológico, empresas del sector cañero.
Social y ambiental	Informe de divulgación orientado a productores agrícolas, asociaciones cañeras y entidades territoriales, destacando los beneficios ambientales y económicos del aprovechamiento sostenible de los residuos de caña mediante compostaje. Este producto contribuirá a fomentar la adopción de prácticas de economía circular, reducir la contaminación por disposición inadecuada y generar conciencia ambiental en la comunidad.	Productores y asociaciones agrícolas, entidades locales de gestión ambiental, comunidad académica y sociedad civil en regiones cañeras.

CARACTERIZACIÓN MICROBIANA DEL COMPOST ELABORADO CON FIBRA DE CAÑA DE AZÚCAR COMO ESTRATEGIA SOSTENIBLE PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Diego Fernando Grueso¹ (diego.grueso00@usc.edu.co)
Yessenia Restrepo Garcia² (yessenia.restrepo00@usc.edu.co)

¹Grupo de Investigación GIMIA, Programa de Microbiología. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La agroindustria de la caña de azúcar en Colombia produce grandes cantidades de subproductos como fibra, bagazo y cachaza. Aunque poseen alto potencial agrícola, suelen gestionarse de forma inadecuada, generando impactos ambientales y desaprovechando nutrientes valiosos. El compostaje se presenta como una alternativa sostenible para transformar estos residuos en enmiendas orgánicas, y su éxito depende en gran medida de la actividad microbiana responsable de la degradación de compuestos lignocelulósicos.

El objetivo de esta investigación fue identificar los principales microorganismos presentes en compost elaborado con fibra de caña de azúcar, mediante una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2014 y 2024. La búsqueda se realizó en bases de datos como Scopus, ScienceDirect, Redalyc y Scielo, siguiendo los lineamientos PRISMA. De 351 documentos iniciales, se seleccionaron 31 estudios tras aplicar criterios de inclusión y exclusión definidos.

Los resultados evidencian la presencia predominante de bacterias heterótrofas aerobias, hongos filamentosos del género *Aspergillus* y actinobacterias capaces de degradar celulosa y lignina, favoreciendo la madurez y estabilidad del compost. Algunos estudios destacan el uso de bioinoculantes y herramientas moleculares para optimizar el proceso y mejorar la calidad del producto final.

Se concluye que la información disponible sigue siendo fragmentada, lo que limita la generación de protocolos técnicos aplicables a nivel local; esta revisión proporciona una base de conocimiento para futuras investigaciones y estrategias sostenibles en el sector agroindustrial.

Palabras clave: *compostaje, fibra de caña de azúcar, microorganismos, residuos agroindustriales, revisión sistemática*

CHARACTERIZATION OF COMPOST PRODUCED FROM SUGARCANE FIBER AS A SUSTAINABLE STRATEGY FOR THE UTILIZATION OF AGROINDUSTRIAL WASTE: A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT

The sugarcane agroindustry in Colombia generates large amounts of by-products such as fiber, bagasse, and filter cake. Although these residues have high agricultural potential, they are often improperly managed, causing environmental impacts and leading to the loss of valuable nutrients. Composting emerges as a sustainable alternative to transform these lignocellulosic residues into organic amendments, where microbial activity plays a key role in determining process efficiency, maturity, and compost quality.

This study aimed to identify the main microorganisms present in compost produced from sugarcane fiber through a systematic review of scientific literature published between 2014 and 2024. The search was conducted in databases such as Scopus, ScienceDirect, Redalyc, and Scielo, following PRISMA guidelines. From an initial set of 351 documents, 31 studies met the established inclusion and exclusion criteria and were analyzed in detail.

Results indicate the predominant presence of aerobic heterotrophic bacteria, filamentous fungi of the genus *Aspergillus*, and actinobacteria capable of degrading cellulose and lignin, thus enhancing compost stability and maturity. Some studies also highlight the use of bioinoculants and molecular tools to optimize microbial activity, accelerate decomposition, and improve the final product's quality.

In conclusion, available information on microbial characterization of compost from sugarcane fiber remains fragmented, limiting the development of technical protocols applicable at a local scale. This review provides a scientific basis for future research and for implementing sustainable waste management strategies in the sugarcane sector.

Keywords: *composting, sugarcane fiber, microorganisms, agro-industrial residues, systematic review*

HIGHLIGHTS

La caracterización microbiana del compost elaborado con fibra de caña de azúcar aún es limitada y fragmentada, lo que dificulta la generación de protocolos estandarizados para su producción.

Los estudios revisados señalan que las bacterias heterótrofas aerobias, los hongos filamentosos del género *Aspergillus* y las actinobacterias son los principales agentes responsables de la degradación de compuestos lignocelulósicos en el compostaje.

El uso de bioinoculantes y técnicas moleculares ha demostrado mejorar la actividad microbiana, reducir los tiempos de estabilización y optimizar la calidad final del compost.

La revisión sistemática evidencia la necesidad de fortalecer la investigación aplicada al compostaje de residuos agroindustriales en Colombia, a fin de impulsar estrategias sostenibles alineadas con los principios de economía circular y bioeconomía regenerativa.

1. INTRODUCCIÓN

La agroindustria de la caña de azúcar representa uno de los sectores productivos más significativos en Colombia, especialmente en departamentos como Valle del Cauca y Cauca, donde su actividad genera empleo, divisas y encadenamientos productivos. No obstante, este sector también es responsable de la generación de grandes cantidades de residuos sólidos como bagazo, cachaza y fibra de caña, que poseen un alto contenido de materia orgánica y nutrientes. Paradójicamente, en lugar de ser aprovechados, estos residuos suelen gestionarse de forma inadecuada mediante prácticas como la quema o el almacenamiento a cielo abierto, lo que provoca emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y desaprovechamiento de materiales valiosos para la agricultura (Peñaranda et al., 2017). En esta línea, Osorio Flórez (2020) evidencia, a través de un caso aplicado en el municipio de Alvarado (Tolima), que la falta de protocolos técnicos y el escaso control de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos limitan la calidad del compost y su uso seguro en sistemas agrícolas.

Ante esta problemática, el compostaje se posiciona como una de las alternativas más viables y sostenibles para valorizar los residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Este proceso biológico, basado en la descomposición aeróbica de la materia orgánica, permite transformar residuos lignocelulósicos complejos en un abono estable, higiénico y enriquecido con nutrientes esenciales que mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Román et al., 2013). Siles Castellano (2021) complementa esta perspectiva al comparar procesos de compostaje industrial con residuos de distinta procedencia, concluyendo que la variabilidad de los materiales y la falta de control de parámetros críticos pueden afectar directamente la estabilidad y madurez del compost, lo cual hace necesario establecer indicadores claros y adaptables a cada contexto.

Además, el uso de compost contribuye a disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos, a cerrar ciclos de nutrientes y a reducir la huella ambiental de la agroindustria. Estudios como el de CEPAL (2021) resaltan que fortalecer estos encadenamientos productivos mediante estrategias de economía circular puede impulsar el desarrollo local, generar empleo verde y fomentar modelos de bioeconomía regenerativa en la región andina.

Un componente determinante para la eficiencia y calidad final del compost es la acción de las comunidades microbianas que intervienen en la degradación de compuestos como la celulosa y la lignina. Bacterias, hongos filamentosos y actinobacterias son responsables de catalizar transformaciones bioquímicas que estabilizan la materia orgánica y mejoran la bioseguridad del producto final. Camacho et al. (2014) refuerzan esta visión al demostrar que la incorporación de cepas específicas de hongos y actinobacterias puede acelerar la descomposición de compuestos complejos como la pectina y la celulosa, estrategia que aporta nuevas posibilidades para optimizar la degradación de la fibra de caña. Mientras que, según Sánchez Gómez (2009), durante el compostaje de residuos azucareros se observa una sucesión microbiana bien definida, donde bacterias mesófilas dominan la fase inicial, bacterias termófilas se activan en la etapa de mayor temperatura y hongos como *Aspergillus flavus* y *A. fumigatus* desempeñan un papel relevante en la fase de maduración. Esta dinámica microbiana influye en la descomposición y, además, condiciona la madurez, estabilidad y calidad del compost.

Pese a estos fundamentos, la caracterización microbiológica específica del compost elaborado con fibra de caña de azúcar sigue siendo fragmentada y dispersa. Investigaciones como la de Roca-García et al. (2021) advierten que la falta de información clara limita la posibilidad de establecer protocolos técnicos basados en evidencia, lo cual obstaculiza la estandarización de procesos y la adopción de innovaciones tecnológicas en contextos locales. En este sentido, experiencias recientes recopiladas en *Compostaje Webinars 2020* de la Red Española de Compostaje evidencian avances en el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante estrategias de co-compostaje y control de variables operativas. Por ejemplo, Idrovo-Novillo et al. (2020) demuestran cómo el co-compostaje, entendido como el tratamiento conjunto de dos o más residuos orgánicos con características complementarias, puede optimizar la relación carbono-nitrógeno, mejorar la aireación y favorecer la degradación de materiales lignocelulósicos, situación que guarda similitud con la problemática de la fibra de caña.

De forma complementaria, Moreno et al. (2020) profundizan en cómo el control de la temperatura y la termotolerancia de las bacterias y hongos determinan la calidad final del compost. Los autores destacan la importancia de comprender la sucesión de poblaciones microbianas, ajustando parámetros de manejo para maximizar la actividad de cada grupo en su fase óptima. Este manejo adecuado permite acelerar la biotransformación de los residuos, reducir la presencia de patógenos y garantizar la obtención de un compost maduro, estable y seguro para su uso agrícola. A su vez, Gómez Sánchez et al. (2020) enfatizan la necesidad de definir indicadores técnicos y microbiológicos que permitan evaluar la estabilidad, madurez y funcionalidad del compost, respaldando la toma de decisiones basadas en criterios objetivos y reproducibles. Estas experiencias muestran la relación estrecha entre el manejo microbiológico y la calidad del producto final.

Por otro lado, Pérez-Sánchez (2020) aborda tendencias emergentes como la aplicación de bioinoculantes microbianos, que permiten potenciar poblaciones de bacterias y hongos beneficiosos para optimizar la eficiencia del proceso. Esta práctica, aún incipiente en Colombia, podría adaptarse a las características particulares de los residuos derivados de la caña de azúcar, aportando soluciones innovadoras para mejorar la calidad y el valor agregado del compost. Sin embargo, la falta de estudios sistematizados que integren estos hallazgos impide su transferencia y aplicación a nivel local. Consolidar este conocimiento resulta fundamental para superar las limitaciones técnicas y ambientales del manejo de residuos agroindustriales en el país.

Para sintetizar la información, es importante recalcar que la gestión inadecuada de los subproductos generados por la agroindustria de la caña de azúcar, como la fibra, el bagazo y la cachaza, ha generado impactos ambientales negativos y representa un desaprovechamiento de recursos con alto potencial agrícola, por lo que el compostaje surge como una alternativa técnica viable para transformar estos residuos en insumos orgánicos útiles y contribuir a la sostenibilidad del sector. Lagos Burbano et al. (2022) destacan que los subproductos de la caña tienen un alto potencial para la producción de compost, lo que permite reducir la dependencia de fertilizantes químicos y fomentar prácticas más sostenibles en la agricultura.

Sin embargo, la eficiencia de este proceso depende del conocimiento técnico sobre la dinámica microbiana y los factores que inciden en la calidad del compost final. Según Bohórquez et al. (2014), parámetros como la relación carbono-nitrógeno inicial son determinantes para lograr compost de buena calidad a partir de subproductos agroindustriales. De igual forma, Rojas y Yenque (2021) señalan que el compostaje, bien gestionado, permite valorizar residuos orgánicos y mejorar la fertilidad de los suelos, alineándose con los principios de economía circular y bioeconomía regenerativa.

De esta forma, la presente revisión sistemática busca organizar información dispersa y aportar una base técnica sólida para orientar futuras investigaciones y estrategias de manejo, respondiendo a los desafíos de sostenibilidad y competitividad que enfrenta la agroindustria colombiana, especialmente en lo relacionado con el aprovechamiento de la fibra de caña de azúcar. Este estudio pretende identificar las especies microbianas predominantes, describir sus funciones ecológicas y establecer las condiciones óptimas que favorecen su actividad durante las distintas fases del compostaje. Contar con esta base de conocimiento facilitará la formulación de lineamientos técnicos, permitirá fortalecer las prácticas de manejo sostenible de residuos agroindustriales y contribuirá a consolidar modelos de economía circular y bioeconomía regenerativa en Colombia, alineados con las metas de sostenibilidad del sector cañero. En este sentido, la investigación busca dar respuesta a la pregunta central: ¿Qué tipos de microorganismos se han identificado en el compost elaborado con fibra de caña de azúcar?

En respuesta a esta pregunta, la presente revisión sistemática tuvo como objetivo identificar los principales microorganismos reportados en el compost elaborado con fibra de caña de azúcar. De manera específica, se buscó describir los grupos microbianos presentes durante las diferentes fases del compostaje, analizar las funciones que desempeñan en la degradación de la materia orgánica y reconocer las condiciones fisicoquímicas que favorecen su actividad y contribuyen a la calidad final del compost.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo de tipo documental, mediante una revisión sistemática de literatura científica relacionada con la caracterización microbiana del compost elaborado a partir de fibra de caña de azúcar. El propósito de la revisión consiste en recopilar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre los microorganismos asociados al proceso de compostaje y su papel en la degradación de residuos agroindustriales derivados de la caña de azúcar.

El proceso de revisión sigue los lineamientos de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual establece directrices claras para garantizar la transparencia, la reproducibilidad y la exhaustividad de las revisiones sistemáticas (Moher et al., 2009).

Tipo de estudio.

El diseño del estudio es documental, ya que se basa en la búsqueda, selección y síntesis de investigaciones relacionadas con la caracterización microbiana del compost elaborado a partir de fibra de caña de azúcar y otros residuos agroindustriales similares. Asimismo, es de tipo descriptivo, pues tiene como propósito identificar y describir los diferentes microorganismos presentes en el proceso de compostaje, así como sus funciones ecológicas y las condiciones que favorecen su actividad, contribuyendo a comprender mejor los factores que influyen en la calidad final del compost.

2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión.

Se seleccionan estudios que:

- Están publicados entre 2014 y 2024.
- Presentan resultados originales sobre la identificación de microorganismos (bacterias, hongos u otros) en compost elaborado con fibra de caña de azúcar o residuos agroindustriales similares.
- Utilizan metodologías microbiológicas reconocidas (cultivos, técnicas moleculares, metagenómica, etc.).
- Están disponibles en texto completo y en bases de datos científicas reconocidas como Scielo, Redalyc, Scopus o ScienceDirect.

Criterios de exclusión.

Se excluirán los artículos que no informen específicamente sobre la identificación de microorganismos presentes en el compost elaborado con fibra de caña de azúcar o en residuos agroindustriales similares. También, se descartarán aquellos estudios que no aporten información relevante para el contexto agroindustrial o que estén enfocados en materiales no relacionados con la composición lignocelulósica de la caña.

Igualmente, se excluirán artículos de opinión, tesis de pregrado, notas técnicas o cartas al editor, publicaciones que no involucren análisis microbiológicos directos (por ejemplo, investigaciones in vitro sin aplicación al compostaje, estudios en modelos animales o simulaciones no validadas), así como documentos de acceso restringido, con información limitada, incompleta o duplicada

Estrategia de búsqueda.

La estrategia de búsqueda se orienta a identificar estudios científicos pertinentes a la caracterización microbiana del compost elaborado con fibra de caña de azúcar, publicados entre 2014 y 2024. Para ello, se utilizan bases de datos académicas reconocidas como Scielo, Redalyc, Dialnet, ScienceDirect, Scopus y Google Scholar, garantizando la inclusión de literatura tanto en español como en inglés.

Se diseñan ecuaciones de búsqueda combinando palabras clave y operadores booleanos, adaptados a los lenguajes de indexación de cada base de datos. Las principales palabras clave son:

- En español: “compostaje”, “fibra de caña”, “residuos agroindustriales”, “microorganismos en compost”, “caracterización microbiana”.
- En inglés: “composting”, “sugarcane fiber”, “agroindustrial residues”, “compost microorganisms”, “microbial characterization”.

Las combinaciones **incluyen** expresiones como:

- "compostaje" AND "fibra de caña" AND "microorganismos"
- "sugarcane fiber" AND "composting" AND "microbial communities"
- "residuos agroindustriales" AND "caracterización microbiológica"
- "compost" AND "microbial diversity" AND "sugarcane bagasse"
-

Además, se aplican filtros por año (2014–2024), idioma (español e inglés), tipo de documento (artículos científicos, tesis, capítulos de libro con revisión por pares) y disponibilidad de texto completo. En el caso de Google Scholar, se priorizan los enlaces a repositorios institucionales, revistas indexadas o publicaciones en acceso abierto.

Durante la búsqueda, se lleva un registro sistemático de los resultados, incluyendo el número total de artículos encontrados por base de datos, los criterios utilizados en cada búsqueda y el número de estudios

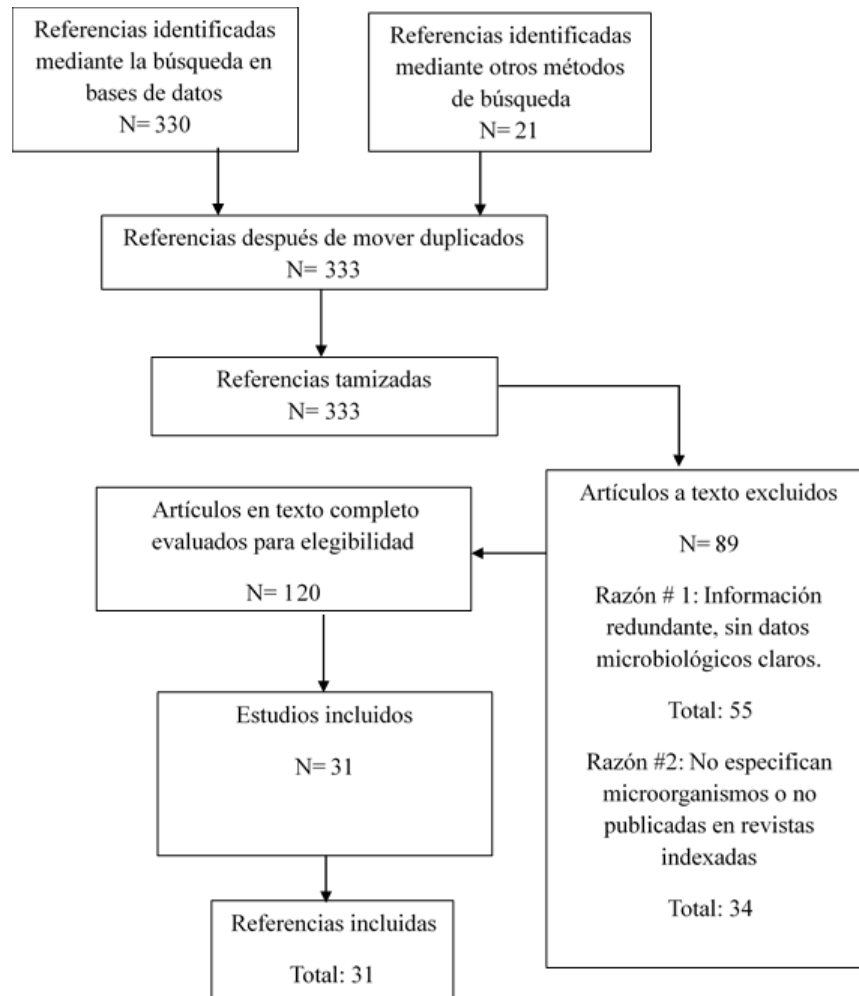
seleccionados. tras aplicar los filtros de inclusión y exclusión. Esta trazabilidad se representa gráficamente mediante el diagrama de flujo PRISMA, mostrando las fases de identificación, selección, elegibilidad e inclusión final de los estudios.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Selección de estudios.

El diagrama de flujo (Figura 1) muestra el proceso de selección de artículos para la revisión sistemática siguiendo los lineamientos PRISMA. De un total de 351 documentos iniciales, 18 fueron eliminados por duplicidad y 213 descartados tras la lectura preliminar de títulos y resúmenes. Posteriormente, 120 artículos fueron evaluados a texto completo, de los cuales 89 no cumplieron los criterios de inclusión. Finalmente, 31 estudios fueron seleccionados para el análisis final.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020. Proceso de selección de artículos teniendo en cuenta los criterios de inclusión, exclusión y el uso de operadores booleanos.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los resultados de las diferentes bases de datos, se utilizó la herramienta de gestión y análisis bibliográfico Mendeley para la identificación y eliminación de artículos duplicados. En total, se encontraron 18 documentos duplicados que fueron excluidos de la muestra inicial.

Para el proceso de screening (Figura 1), se realizó una lectura preliminar del título y el resumen (abstract) de cada artículo. Como resultado, se descartaron 213 documentos que no abordaban la identificación de microorganismos en compost elaborado con fibra de caña de azúcar o que trataban el compostaje de materiales no relacionados estructuralmente con residuos lignocelulósicos de caña.

A pesar del uso de palabras clave y filtros específicos, se encontraron varios estudios enfocados en otros tipos de residuos agroindustriales sin similitud composicional con la fibra de caña, así como artículos que no correspondían a investigaciones originales ni a revisiones sistemáticas, o que se encontraban en idiomas distintos a español o inglés. Asimismo, 102 artículos no contaban con acceso abierto, por lo que también fueron eliminados.

Tras esta depuración inicial, se seleccionaron 120 artículos para lectura completa y evaluación crítica. Posteriormente, se excluyeron 89 estudios que contenían información redundante, no presentaban datos microbiológicos claros, no especificaban los grupos de microorganismos identificados o no se encontraban publicados en revistas indexadas según las plataformas SCImago o equivalentes de reconocimiento académico.

La mayoría de los estudios incluidos en esta revisión fueron obtenidos de bases de datos como ScienceDirect, Scopus, Redalyc y Scielo, las cuales ofrecen un repositorio amplio y actualizado en las áreas de microbiología, biotecnología, ciencias agrícolas y ambientales, facilitando el acceso a literatura relevante y de calidad sobre la caracterización microbiana en compost de origen agroindustrial.

Cabe resaltar que la mayoría de los artículos seleccionados están escritos en español, mientras que cerca del 30% corresponden a publicaciones en inglés. Más de la mitad de los estudios incluidos presentan datos primarios obtenidos a través de metodologías moleculares, metagenómicas o análisis microbiológicos directos en compost, lo cual permite describir con mayor precisión las comunidades bacterianas y fúngicas presentes durante el proceso de degradación de la fibra de caña.

Síntesis de resultados

Una vez seleccionados los artículos que conforman esta revisión sistemática se organizó la información relevante en tablas, con el fin de estructurar y sintetizar los hallazgos de manera clara y dar cumplimiento a los objetivos específicos propuestos para este estudio.

A continuación, en la **tabla 1**, se recogen algunos de los estudios seleccionados en la revisión, indicando su autoría, año de publicación, país o región de aplicación, características de la muestra, enfoque metodológico y hallazgos más relevantes. Esta información permite identificar las tendencias investigativas, las variaciones contextuales y las conclusiones más consistentes sobre la dinámica microbiana y la calidad del compost derivado de residuos azucareros.

Tabla 1. Resultados integrados de los estudios

Autor(es) / Año	Título	País / Región	Muestra (n)	Método / Enfoque	Principales hallazgos
-----------------	--------	---------------	-------------	------------------	-----------------------

Sánchez Gómez, 2009	Caracterización microbiológica del proceso de compostaje a partir de residuos azucareros	Venezuela	Pilas de compost de 10 t con cachaza y bagazo	Recuento en placas, NMP para bacterias celulolíticas, pruebas de germinación	Identificó sucesión microbiana: bacterias mesófilas → termofílicas → hongos (<i>Aspergillus</i> spp.); calidad limitada para germinación.
Bohórquez et al., 2014	Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar	Colombia	Compost de bagazo y cachaza (3 tratamientos)	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos	Mejor calidad con mezclas equilibradas; alta variabilidad en nutrientes y microbiota según proporción inicial C/N.
Diallo et al., 2017	Composting of sugar cane bagasse by <i>Bacillus</i> strains	Senegal	Ensayos de laboratorio con bagazo y <i>Bacillus</i> spp.	Inoculación de cepas bacterianas, análisis enzimático	Mayor actividad celulolítica y velocidad de descomposición; incremento de nutrientes biodisponibles en compost final.
Mello et al., 2016	Nutrient availability shapes the microbial community structure in sugarcane bagasse compost-derived consortia	Brasil	Consortios microbianos en diferentes sustratos	Secuenciación molecular, análisis de diversidad microbiana	Alta diversidad microbiana; presencia de especies lignocelulolíticas clave; nutrientes determinan composición comunitaria.
Nakhla et al., 2019	Microbial community dynamics during sugarcane bagasse composting and its influence on organic matter degradation	Arabia Saudita	Compostaje experimental en túneles de aireación	Técnicas moleculares (qPCR, secuenciación), análisis de carbono y lignina	Variaciones dinámicas de bacterias y hongos; actinobacterias dominantes en etapas finales; correlación positiva con degradación lignina.
Zhang & Sun, 2016	Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc	China	Compostaje en dos etapas con GW + SCB + EGM	Ensayos piloto, análisis fisicoquímico, enzimático y microbiológico	Mezcla 15% SCB y 20% EGM mejoró aireación, temperatura y nutrientes; reducción del tiempo de maduración a 21 días.

Saranraj & Stella, 2014	Composting of Sugar Mill Wastes: A Review	India	Revisión de literatura	Compilación de estudios sobre compostaje de bagazo y pressmud	Compostaje transforma residuos azucareros en fertilizante orgánico rico en nutrientes; rol clave de celulasas y ligninasas microbianas.
Rodríguez et al., 2017	El abono elaborado del bagazo de caña de azúcar como alternativa fertilizante	México	Ensayo en parcelas agrícolas con compost de bagazo	Análisis de nutrientes, rendimiento agrícola, parámetros microbiológicos	Mejora fertilidad del suelo, disponibilidad de P y N y aumento del rendimiento de caña de azúcar.
Pérez-Iglesias et al., 2017	Evaluación del compostaje y sus efectos en suelos tropicales	Perú	Suelos tratados con compost de bagazo y otros residuos	Análisis físico-químico y biológico del suelo	Mayor retención de nutrientes y mejor estructura del suelo tras aplicación de compost; estímulo a la microbiota nativa.
Gordillo et al., 2011	Efecto del compost en el rendimiento agrícola de caña de azúcar	Colombia	Ensayos en campo con compost de residuos azucareros	Evaluaciones agronómicas, calidad del suelo	Incremento en producción y mejoras significativas en fertilidad del suelo y diversidad microbiana.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados por los autores citados en la revisión sistemática.

Análisis de resultados.

La presente revisión sistemática tuvo como objetivo identificar y analizar los principales microorganismos presentes en el compost elaborado a partir de fibra de caña de azúcar, así como las condiciones que favorecen su actividad durante el proceso de compostaje. En total, se revisaron y analizaron más de 30 estudios publicados entre 2014 y 2024, provenientes de bases de datos científicas y repositorios especializados. Los artículos seleccionados abordaron aspectos químicos, microbiológicos y agronómicos del compost derivado de subproductos de la caña, lo cual permitió integrar hallazgos relevantes y detectar vacíos en el conocimiento científico.

Caracterización química y propiedades del compost de caña de azúcar

El compostaje de fibra de caña de azúcar depende de múltiples variables fisicoquímicas que condicionan la actividad de las comunidades microbianas responsables de la degradación de la materia orgánica. Los principales residuos agroindustriales de la caña, como el bagazo, la cachaza y las cenizas, presentan diferencias significativas en su composición inicial. El bagazo, constituido mayoritariamente por celulosa y lignina, se caracteriza por su alto contenido de carbono y baja proporción de nitrógeno, lo que eleva la relación carbono/nitrógeno (C/N) y dificulta su descomposición rápida. Por su parte, la cachaza aporta nitrógeno, fósforo, potasio y calcio en mayor concentración, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes para las bacterias y hongos degradadores (Bohórquez et al., 2014; Román et al., 2013). Esta complementariedad explica por qué la

combinación de ambos residuos genera mejores resultados que su uso individual en procesos de compostaje. El proceso de compostaje inicia con la recolección y transporte del bagazo de caña de azúcar desde la planta industrial hasta las áreas de acopio, donde será sometido a las etapas de preparación y descomposición controlada (Figura 2).

Figura 2. Acopio y transporte del bagazo de caña de azúcar para compostaje



Acopio y carga del bagazo de caña de azúcar proveniente del proceso industrial, destinado a la elaboración de compost. Esta fase inicial consiste en la recolección y traslado del subproducto desde la planta de procesamiento hasta las áreas designadas para el compostaje. **Fuente:** elaboración propia (2025).

Pérez Méndez et al. (2011) observaron que al emplear mezclas con más del 70 % de bagazo, los procesos de compostaje se prolongaban debido a la escasa disponibilidad de nitrógeno, generando acumulación de material fibroso y limitando la fase termofílica. Por el contrario, al ajustar la proporción de cachaza se aceleraron las reacciones biológicas, alcanzando temperaturas superiores a 55 °C que favorecieron la sanitización del material y la reducción de patógenos. Estos hallazgos confirman que la proporción de los materiales iniciales define tanto la dinámica microbiana, como también el tiempo total del proceso y la calidad del compost resultante.

Bohórquez et al. (2014) concluyen que una relación C/N cercana a 25–30:1 es la más adecuada para estimular el crecimiento de microorganismos descomponedores y evitar pérdidas de nitrógeno por volatilización. En su investigación, el tratamiento con 50 % de bagazo, 50 % de cachaza y adición de vinaza alcanzó una estabilidad óptima en 90 días, con valores de pH neutros, textura fina y elevadas concentraciones de nutrientes esenciales. La vinaza, subproducto líquido de la industria azucarera, aportó nitrógeno y humedad, mejorando la eficiencia microbiana y favoreciendo la mineralización de la materia orgánica.

De manera complementaria, López Bravo et al. (2017) evidencian que la variabilidad en la proporción de subproductos influye de forma directa en la concentración final de nutrientes, afectando la capacidad del compost para mejorar la fertilidad del suelo y su estabilidad biológica. Por ejemplo, cuando se utilizaron mezclas con menor contenido de cachaza, el producto final presentó deficiencia de nitrógeno y una maduración incompleta, lo que podría limitar su efectividad como fertilizante orgánico.

La literatura revisada coincide en que la gestión de parámetros críticos, como humedad, tamaño de partícula y aireación, es indispensable para activar las fases metabólicas del compostaje. Román et al. (2013) señalan que mantener niveles de humedad entre 40 % y 60 % y un pH inicial cercano a la neutralidad promueve el desarrollo de bacterias mesófilas en la fase temprana y facilita la transición a comunidades termofílicas responsables de la higienización y degradación de compuestos lignocelulósicos. Cuando estos parámetros no son controlados, el proceso se vuelve irregular y se prolonga hasta 17 semanas, como reportaron Pérez Méndez et al. (2011) en sistemas semi-industriales de México.

Estos resultados permiten establecer que la composición química inicial determina la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y condiciona la actividad y sucesión de microorganismos durante el compostaje. Una mezcla equilibrada entre bagazo y cachaza, complementada con fuentes adicionales de nitrógeno, constituye una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia del proceso y obtener un compost maduro, estable y libre de contaminantes. Esta base fisicoquímica es clave para comprender cómo las poblaciones microbianas actúan en las diferentes fases del compostaje, aspecto que se desarrolla en el siguiente apartado de esta revisión.

Microorganismos presentes y dinámica poblacional durante el compostaje de fibra de caña de azúcar

El compostaje de residuos agroindustriales de caña de azúcar constituye un proceso biológico complejo en el que interactúan diversos grupos microbianos responsables de la transformación de la materia orgánica en compuestos estables y útiles para la agricultura. Bacterias, hongos y actinobacterias actúan de manera secuencial y complementaria, influyendo en la velocidad de descomposición, la higienización del material y la calidad final del compost (Sánchez Gómez, 2009; Camacho et al., 2014; Moreno et al., 2020).

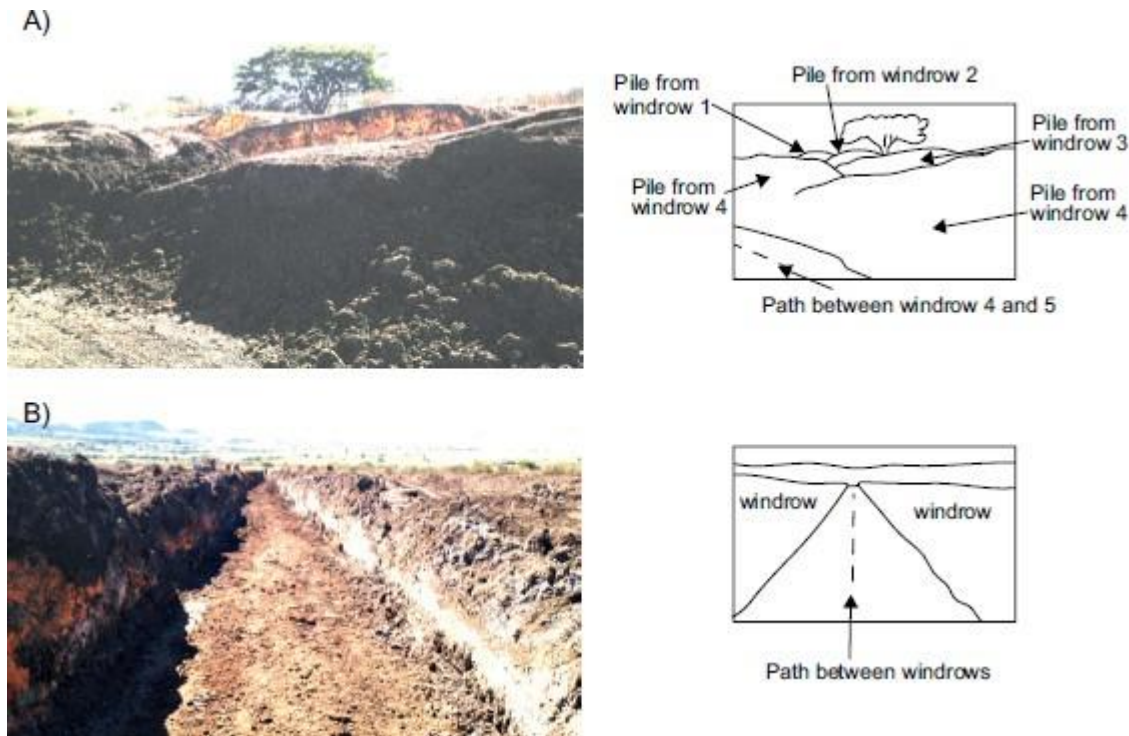
En la fase mesofílica inicial predominan bacterias heterótrofas aerobias que metabolizan compuestos fácilmente degradables, como azúcares y proteínas simples, generando calor y elevando la temperatura del sustrato (Sánchez Gómez, 2009; Medina et al., 2018). Géneros como *Bacillus* y *Pseudomonas* son recurrentemente reportados en esta etapa, desempeñando un papel esencial en la mineralización inicial y el incremento de la actividad biológica (Pérez-Iglesias et al., 2017). Sin embargo, cuando la relación carbono/nitrógeno es elevada, característica del bagazo de caña, la actividad bacteriana se ralentiza, prolongando el proceso de compostaje y reduciendo la eficiencia de degradación (Bohórquez et al., 2014).

La fase termofílica, que se desarrolla a temperaturas superiores a 50–60 °C, favorece la proliferación de bacterias termotolerantes y actinobacterias, como las del género ***Streptomyces***, que producen enzimas hidrolíticas capaces de romper polisacáridos estructurales como la celulosa y la hemicelulosa (Moreno et al., 2020; Gordillo et al., 2011). Esta etapa es crucial para la higienización del material, pues las altas temperaturas contribuyen a eliminar patógenos y semillas de malezas, asegurando un producto final más seguro para su aplicación agrícola.

En la fase de maduración, los hongos filamentosos adquieren un papel predominante debido a su capacidad para degradar moléculas más complejas, especialmente lignina y compuestos fenólicos. Especies como ***Aspergillus flavus***, ***A. fumigatus*** y ***A. niger*** han sido ampliamente reportadas en compostaje de residuos azucareros, donde contribuyen a la formación de sustancias húmicas estables que mejoran la calidad del compost (Sánchez Gómez, 2009; Camacho et al., 2014; Jara Olea et al., 2017). En esta misma etapa, las actinobacterias continúan activas, favoreciendo la mineralización avanzada y aportando metabolitos con actividad antimicrobiana que enriquecen la funcionalidad biológica del compost (Velázquez Fernández et al., 2020).

Velázquez-Fernández et al. (2020) documentaron observaciones macroscópicas que evidencian la acción de comunidades fúngicas durante el proceso de compostaje de bagazo de caña de azúcar. En su estudio, se registró una coloración anaranjada en las hileras de compost recién dispuestas, atribuida al crecimiento de hongos filamentosos responsables de la degradación de compuestos lignocelulósicos (**Figura 3**). Esta manifestación visual confirma la importancia y el rol fundamental de los hongos en las etapas intermedias y finales del compostaje, complementando los análisis microbiológicos que identifican especies predominantes como ***Aspergillus flavus*, *A. fumigatus* y *A. niger***. La presencia de colonias fúngicas visibles refuerza la importancia de comprender la sucesión microbiana y las condiciones ambientales que favorecen su actividad para optimizar la calidad y madurez del compost final.

Figura 3. Observaciones macroscópicas de la actividad fúngica en hileras de compost de bagazo de caña de azúcar



Fuente: Velázquez-Fernández, J. B., Hernández-Rosales, I. P., & Contreras Ramos, S. M. (2020). Composting sugar cane bagasse at full scale: Organic matter decay kinetics, metagenomics and plant-growth promoting bacteria capabilities. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 361–370.

Vista longitudinal y transversal de dos hileras de compost de bagazo de caña de azúcar.

A) Imagen y esquema longitudinal donde se observan cinco pilas provenientes de diferentes hileras; la coloración anaranjada se debe al crecimiento de hongos en las hileras recién dispuestas.

B) Vista transversal entre dos hileras, donde la hilera derecha corresponde a material más reciente. La presencia de hongos se evidencia por el color característico en la hilera izquierda.

La literatura científica también evidencia que la presencia y abundancia de estos microorganismos depende de factores de manejo como la relación C/N inicial, la humedad, el pH y la aireación. Rodríguez et al. (2017) encontraron que un compostaje controlado de subproductos de caña mejora la descomposición microbiana e influye en la disponibilidad final de nutrientes para el suelo, incrementando el rendimiento agrícola de los cultivos. Pérez-Iglesias et al. (2017) añaden que los parámetros microbiológicos, junto con el control de la temperatura y la oxigenación, son indicadores fiables de madurez y calidad, permitiendo determinar el momento óptimo para la aplicación del compost en sistemas agrícolas.

En años recientes, Pérez-Sánchez (2020) ha resaltado el potencial del uso de bioinoculantes, es decir, consorcios microbianos seleccionados, para acelerar la descomposición de materiales lignocelulósicos como la fibra de caña. Aunque esta práctica aún es incipiente en la agroindustria colombiana, se proyecta como una alternativa innovadora para optimizar la eficiencia del compostaje, mejorar el perfil microbiológico del producto final y reducir tiempos de maduración (Gordillo et al., 2011; Camacho et al., 2014).

En otras palabras, la sucesión microbiana durante el compostaje de fibra de caña es un proceso dinámico que involucra fases bien definidas, con la participación de bacterias mesófilas y termófilas, actinobacterias y hongos ligninolíticos. La optimización de las condiciones ambientales y nutricionales, junto con el uso de inoculantes microbianos especializados, podría mejorar significativamente la calidad del compost producido, contribuyendo al aprovechamiento sostenible de los residuos agroindustriales de la caña de azúcar y al fortalecimiento de la bioeconomía circular en contextos locales y regionales.

En la **tabla 2** se presenta un análisis comparativo de los métodos de identificación microbiana empleados en los diferentes trabajos revisados, diferenciando las técnicas clásicas (cultivos, recuentos y pruebas enzimáticas) de las metodologías moleculares más recientes (qPCR, secuenciación de 16S rRNA, metagenómica). Esto evidencia la evolución tecnológica en la investigación sobre microbiología del compost y la necesidad de estandarizar herramientas que permitan obtener resultados más precisos y replicables

Tabla 2. Métodos de identificación microbiana y hallazgos

Autor(es) / Año	Método de identificación microbiana	Tipo de análisis	Hallazgos principales
Sánchez Gómez, 2009	Recuento en placas para bacterias mesófilas y termófilas; NMP para bacterias celulolíticas; aislamiento e identificación fúngica	Técnicas clásicas de cultivo	Sucesión de poblaciones: bacterias mesófilas → termófilas → hongos (<i>Aspergillus</i> spp.); baja calidad germinativa del compost final.
Bohórquez et al., 2014	Análisis microbiológico básico en compost maduro (cultivo en medios selectivos)	Cultivo y parámetros fisicoquímicos	Variabilidad en comunidades bacterianas según proporción de bagazo y cachaza; correlación con calidad del compost.
Diallo et al., 2017	Inoculación de cepas de <i>Bacillus</i> , recuento en placas, pruebas enzimáticas (celulasas y amilasas)	Cultivo y cuantificación enzimática	Aceleración del proceso y aumento de nutrientes disponibles gracias a la acción de <i>Bacillus</i> .
Mello et al., 2016	Secuenciación de 16S rRNA y análisis de diversidad (metagenómica)	Técnicas moleculares avanzadas	Identificación de consorcios microbianos complejos especializados en degradación de lignocelulosa y solubilización de fósforo.
Nakhla et al., 2019	qPCR y secuenciación masiva de bacterias y hongos durante todas las fases del compostaje	Técnicas moleculares cuantitativas	Variaciones dinámicas de poblaciones bacterianas y fúngicas; actinobacterias y hongos ligninolíticos clave en la maduración.
Zhang & Sun, 2016	Recuento microbiano total, análisis de actividad enzimática (celulasas, lacasas) en compostaje combinado SCB+EGM	Cultivo y enzimología	Aumento de actividad microbiana y reducción del tiempo de compostaje a 21 días con mezcla optimizada.

Saranraj & Stella, 2014	Revisión de métodos previos: cultivo, microscopía, ensayos enzimáticos, análisis molecular emergente	Revisión documental	Necesidad de combinar técnicas clásicas y moleculares para evaluar microbiota y optimizar procesos de compostaje de residuos azucareros.
Rodríguez et al., 2017	Evaluación de microorganismos en suelo post-aplicación mediante cultivos y conteo de unidades formadoras de colonias (UFC)	Cultivo en suelos tratados	Incremento significativo de microorganismos benéficos en la rizosfera tras aplicación de compost de bagazo.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados por los autores citados en la revisión sistemática.

Impacto agronómico y beneficios en suelos y cultivos derivados del compostaje de fibra de caña de azúcar

El compost elaborado a partir de residuos de la agroindustria azucarera, en particular la fibra de caña, representa una enmienda orgánica con gran potencial para mejorar las propiedades del suelo y contribuir al desarrollo sostenible de sistemas agrícolas. La acción de microorganismos durante el compostaje transforma la materia lignocelulósica en compuestos más estables y nutritivos y también determina la calidad y funcionalidad del producto final, lo que repercute directamente en la productividad de los cultivos y en la salud del suelo (Bohórquez et al., 2014; Roca-García et al., 2021). En la fase final, el compost elaborado con fibra de caña de azúcar se carga y transporta a los lotes agrícolas para su uso como fertilizante orgánico (Figura 4).

Figura 4. Carga del compost final para su aplicación agrícola



Proceso de carga del compost terminado, destinado al lote agrícola donde será aplicado como fertilizante orgánico dentro de las operaciones del Ingenio Río Paila Castilla. La imagen ilustra la etapa final del ciclo de compostaje, en la cual el material previamente procesado se prepara para su transporte y uso en campo. Fuente: elaboración propia (2025).

Diversos estudios han demostrado que el compost de bagazo y otros subproductos de caña incrementa la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes esenciales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la necesidad de fertilizantes químicos (Rodríguez et al., 2017; Lagos Burbano et al., 2022). Este aporte nutricional se debe a la mineralización progresiva de la materia orgánica, mediada por poblaciones bacterianas y fúngicas capaces de descomponer celulosa, hemicelulosa y lignina, liberando nutrientes que son gradualmente asimilables por las plantas (Sánchez Gómez, 2009; Camacho et al., 2014).

Además, la incorporación de compost favorece mejoras físicas en el suelo, tales como aumento de la capacidad de retención de agua, reducción de la compactación y mayor estabilidad estructural de los agregados (Jara Olea et al., 2017). Estos efectos están relacionados con la acción de metabolitos microbianos y sustancias húmicas generadas durante el proceso, que promueven la formación de complejos órgano-minerales y mejoran la porosidad del suelo (Saranraj & Stella, 2014). En contextos de alta presión agrícola, como las zonas cañeras del Valle del Cauca, estas mejoras son determinantes para contrarrestar la degradación del suelo causada por prácticas intensivas y uso excesivo de insumos sintéticos.

Estudios recientes han evidenciado que el compost además de aportar nutrientes, también actúa como bioinoculante natural, favoreciendo la colonización de microorganismos benéficos en la rizosfera. Diallo et al. (2017) demostraron que la inoculación de bagazo con cepas de *Bacillus* durante el compostaje incrementó la actividad enzimática y la disponibilidad de nitrógeno orgánico en el suelo, lo que se tradujo en un mejor crecimiento radicular y mayor biomasa aérea en los cultivos tratados. De forma complementaria, Mello et al. (2016) encontraron que la estructura de la comunidad microbiana en consorcios derivados de compost de bagazo está determinada por la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo la proliferación de especies lignocelulolíticas y solubilizadoras de fósforo, las cuales potencian la biodisponibilidad de nutrientes y estimulan el desarrollo vegetal.

La interacción positiva entre microorganismos del compost y la rizosfera ha sido también observada por Nakhla et al. (2019), quienes identificaron la dinámica poblacional de bacterias y hongos durante el compostaje de bagazo y su efecto en la degradación de materia orgánica. Su estudio evidenció que poblaciones termofílicas y actinobacterias especializadas aumentan la liberación de nutrientes y mejoran las condiciones del sustrato para el establecimiento de microorganismos promotores de crecimiento vegetal (PGPB), impactando de forma directa la productividad agrícola y la resiliencia del suelo frente a estreses ambientales.

Por otro lado, la adición de fibra de caña en co-compostaje con otros residuos agrícolas puede acelerar los procesos de descomposición y mejorar la calidad del producto final. Zhang y Sun (2016) demostraron que la combinación de bagazo de caña y orujo de uva agotado optimizó la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana, reduciendo el tiempo de compostaje de 90–270 días a solo 21 días. Este hallazgo muestra la importancia de combinar matrices orgánicas complementarias para potenciar el proceso y obtener compost maduro en tiempos más cortos, lo que puede ser una estrategia viable para ingenios azucareros en países como Colombia.

La aplicación del compost elaborado con bagazo también se ha vinculado a mejoras en el rendimiento de cultivos. Rodríguez et al. (2017) reportaron incrementos significativos en la producción de caña de azúcar al sustituir parcialmente fertilizantes químicos por compost de residuos del mismo cultivo, observando suelos más fértiles y menor lixiviación de nutrientes. De manera similar, Pérez-Iglesias et al. (2017) concluyeron que el uso de compost en suelos tropicales incrementa la retención de fósforo y nitrógeno, favoreciendo la germinación y crecimiento inicial de plántulas, lo que resulta en una mejor eficiencia productiva a mediano plazo.

Adicionalmente, varios estudios han resaltado el potencial del compost para mejorar la actividad biológica del suelo y su capacidad de secuestro de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Velázquez-Fernández et al. (2020) encontraron que durante el compostaje de bagazo se desarrollan bacterias con capacidad promotora de crecimiento vegetal y fijadoras de nitrógeno, que al ser incorporadas al suelo incrementan la biomasa microbiana y favorecen el almacenamiento de carbono orgánico estable. Estos beneficios ecológicos se complementan con la reducción de gases de efecto invernadero frente a la disposición inadecuada de los residuos, como la quema o el abandono a cielo abierto (Peñaranda et al., 2017).

Finalmente, la **Tabla 3** resume los impactos agronómicos atribuidos al uso de compost elaborado con fibra de caña de azúcar, destacando sus efectos sobre la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana benéfica y el rendimiento de los cultivos. Esta información es clave para comprender el potencial del compostaje como estrategia sostenible para la valorización de residuos agroindustriales y la transición hacia modelos de economía circular en el sector cañero.

Tabla 3. Impactos agronómicos del compost de fibra de caña de azúcar en suelo y cultivos

Autor(es) / Año	País / Región	Tipo de compost / Residuos utilizados	Cultivo o aplicación	Impactos agronómicos reportados
Bohórquez et al., 2014	Colombia	Bagazo y cachaza	Suelo agrícola en etapa experimental	Mejora la estructura del suelo, aumento de materia orgánica y aporte significativo de N, P y K en comparación con testigos.
Rodríguez et al., 2017	México	Bagazo de caña compostado	Parcelas de caña de azúcar	Incremento en la fertilidad del suelo, mayor retención de nutrientes y aumento en el rendimiento de la caña.
Pérez-Iglesias et al., 2017	Perú	Compost de residuos de caña y estiércol	Suelos tropicales tratados en etapa pre-siembra	Mayor disponibilidad de fósforo y nitrógeno; incremento de la capacidad de retención de agua y mejor germinación de plántulas.
Gordillo et al., 2011	Colombia	Compost de residuos azucareros	Cultivos de caña de azúcar	Incremento en producción y rendimiento de caña; mejor actividad microbiana en la rizosfera.
Diallo et al., 2017	Senegal	Bagazo inoculado con <i>Bacillus</i> spp.	Ensayos en laboratorio y suelo controlado	Mayor actividad enzimática, aceleración del compostaje y mejor disponibilidad de nitrógeno en el sustrato final.
Velázquez-Fernández et al., 2019	México	Bagazo compostado en sistemas semi-industriales	Evaluaciones en suelo agrícola	Incremento de biomasa microbiana del suelo, fijación biológica de nitrógeno y mejora del secuestro de carbono.
Zhang & Sun, 2016	China	Compost de desechos verdes con 15% bagazo de caña y 20% orujo de uva	Aplicación experimental en suelos de parque y jardines	Reducción del tiempo de compostaje (21 días), mejor estructura del suelo, aumento de nutrientes disponibles.
Saranraj & Stella, 2014	India	Bagazo y pressmud compostados	Revisión general de estudios en cultivos variados	Aporte sostenido de nutrientes, mejora de la capacidad de intercambio catiónico y del contenido de carbono estable del suelo.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados por los autores citados en la revisión sistemática.

En conjunto, la evidencia científica indica que el compostaje de fibra de caña de azúcar ofrece una solución ambientalmente sostenible para el manejo de residuos agroindustriales, mientras que, aporta beneficios agronómicos comprobados: mejora de la fertilidad y estructura del suelo, incremento en la productividad de cultivos, aumento de la diversidad microbiana y contribución a la bioeconomía circular. La incorporación de prácticas biotecnológicas, como el uso de cepas inoculantes específicas (Diallo et al., 2017; Mello et al., 2016) y

procesos optimizados de co-compostaje (Zhang & Sun, 2016), abre la posibilidad de escalar estas soluciones y adaptarlas a las necesidades de los ingenios colombianos, favoreciendo una transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles y eficientes.

Brechas de conocimiento y oportunidades para la mejora en el compostaje de fibra de caña de azúcar

Pese a los avances significativos en el estudio del compostaje de residuos agroindustriales, incluida la fibra de caña de azúcar, persisten importantes brechas de conocimiento que limitan la adopción de procesos optimizados y estandarizados a nivel industrial. La literatura revisada indica que los resultados sobre dinámica microbiana, calidad del compost y beneficios agronómicos son aún heterogéneos, lo que dificulta establecer protocolos técnicos reproducibles y adaptables a las condiciones de producción en Colombia (Roca-García et al., 2021; Osorio Flórez, 2020).

Una de las principales brechas identificadas es la escasa caracterización microbiológica profunda de los consorcios microbianos que participan en la degradación de lignocelulosa en el bagazo y fibra de caña. La mayoría de estudios en Latinoamérica aún se basan en técnicas tradicionales de cultivo y recuento (Sánchez Gómez, 2009; Bohórquez et al., 2014), que subestiman la diversidad real de bacterias y hongos involucrados en el proceso. Investigaciones recientes con herramientas metagenómicas, como la de Nakhla et al. (2019), evidencian que la comunidad microbiana es mucho más compleja y dinámica de lo que previamente se pensaba, con variaciones importantes entre las etapas mesofílica, termofílica y de maduración. Sin embargo, estos estudios son escasos y fragmentados, lo que dificulta definir indicadores biológicos universales de calidad y madurez del compost.

Otra brecha relevante se relaciona con la falta de optimización de los procesos de compostaje en condiciones tropicales, propias de los ingenios colombianos. Si bien Zhang y Sun (2016) demostraron que el co-compostaje con bagazo y otros residuos, como orujo de uva, mejora la aireación, ajusta la relación C/N y reduce el tiempo de maduración hasta un 75%, estas estrategias aún no se han evaluado ampliamente en los residuos locales de la caña de azúcar. Tampoco se han establecido proporciones y combinaciones óptimas para acelerar la descomposición sin comprometer la estabilidad final del producto, lo que representa un campo abierto a la investigación aplicada.

En cuanto a la bioestimulación del proceso, Diallo et al. (2017) y Mello et al. (2016) aportan evidencia sobre el uso de cepas bacterianas específicas y consorcios microbianos especializados para mejorar la degradación de la fibra y la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, en la región no existen lineamientos claros para la selección, escalamiento y aplicación de bioinoculantes en compostaje industrial de bagazo, lo que representa una oportunidad para el desarrollo de soluciones biotecnológicas adaptadas a las matrices lignocelulósicas locales. La incorporación de estas prácticas podría reducir tiempos de compostaje, aumentar la calidad microbiológica y nutricional del producto final y disminuir la variabilidad entre lotes.

Otra limitación observada es la ausencia de estándares técnicos y normativos específicos para compost derivado de subproductos de caña de azúcar. Estudios como los de Saranraj y Stella (2014) y Lagos Burbano et al. (2022) señalan que la falta de parámetros de referencia sobre estabilidad, madurez y bioseguridad dificulta su inserción en mercados agrícolas formales, restringiendo su uso masivo en sistemas productivos. Esto se suma a la escasa capacitación técnica de productores y al bajo nivel de inversión en infraestructura de compostaje, que limita la calidad y el control del proceso (Osorio Flórez, 2020).

Finalmente, existe una brecha en la evaluación de impactos a largo plazo del uso de compost de fibra de caña en suelos y cultivos. Aunque estudios como los de Rodríguez et al. (2017) y Pérez-Iglesias et al. (2017) reportan mejoras en la productividad y fertilidad de suelos tratados, son escasas las investigaciones que analicen efectos acumulativos tras varios ciclos de cultivo, interacciones con microbiota nativa y contribución al secuestro de carbono en sistemas cañeros. Este vacío limita la evidencia necesaria para promover políticas de economía circular y bioeconomía regenerativa en la agroindustria azucarera (CEPAL, 2021).

Frente a estas brechas, se abren varias oportunidades de mejora: (i) implementar estudios metagenómicos para comprender mejor la diversidad y funciones microbianas en cada etapa del compostaje; (ii) evaluar sinergias de

co-compostaje con otros residuos orgánicos locales que permitan mejorar la aireación, humedad y relación C/N; (iii) desarrollar bioinoculantes adaptados a matrices lignocelulósicas para acelerar la degradación y enriquecer el compost en microorganismos promotores del crecimiento vegetal; (iv) establecer protocolos técnicos y normativos claros que garanticen calidad y bioseguridad del producto final; y (v) realizar ensayos agronómicos a mediano y largo plazo para cuantificar los beneficios ambientales, económicos y productivos del uso de compost en sistemas agrícolas basados en caña de azúcar.

Abordar estas áreas de investigación contribuiría a cerrar las brechas existentes, facilitar la adopción del compostaje como estrategia central de manejo de residuos agroindustriales y fortalecer la transición hacia sistemas agrícolas sostenibles en el sector azucarero colombiano, reduciendo la dependencia de insumos sintéticos y mejorando la resiliencia de los suelos frente al cambio climático.

1. CONCLUSIONES

De este estudio se concluye que el compostaje de fibra de caña de azúcar es una estrategia con alto potencial para la valorización de los residuos agroindustriales en Colombia y otros países productores de caña. La revisión de literatura evidencia que la microbiota presente en el proceso –bacterias mesófilas, termófilas, actinobacterias y hongos filamentosos– cumple un papel determinante en la descomposición de compuestos lignocelulósicos, favoreciendo la formación de un abono estable y rico en nutrientes esenciales para los suelos agrícolas. Sin embargo, la caracterización de estas comunidades microbianas continúa siendo limitada y dispersa, lo que dificulta establecer protocolos técnicos estandarizados para la producción de compost de calidad.

Adicionalmente, se identificó que variables como la relación carbono/nitrógeno, la aireación, la humedad y la temperatura son importantes para garantizar la eficiencia del proceso; estudios recientes proponen el uso de bioinoculantes y combinaciones de residuos orgánicos (co-compostaje) como alternativas para acelerar la descomposición y mejorar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del compost. Aun así, persisten vacíos de conocimiento respecto a la identificación molecular de los microorganismos involucrados, su dinámica a lo largo de las fases del compostaje y la evaluación a largo plazo de los beneficios en la estructura y fertilidad del suelo.

Por último, y no menos importante, se considera necesario impulsar investigaciones futuras que integren metodologías moleculares avanzadas y pruebas de campo en diferentes contextos productivos; esto permitiría establecer indicadores confiables de calidad y bioseguridad del compost, optimizar los procesos en condiciones tropicales y fomentar políticas de economía circular en la agroindustria azucarera. Asimismo, el desarrollo de guías técnicas y normativas específicas podría promover el uso del compost de fibra de caña de azúcar a mayor escala, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental, la reducción de residuos y la competitividad del sector agrícola en la región.

2. AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la culminación de este proceso académico. En primer lugar, agradezco el apoyo incondicional de mi familia, cuyo aliento constante y motivación fueron fundamentales para mantenerme enfocado y perseverante a lo largo de mi formación profesional.

Extiendo mi gratitud a mis docentes y asesores académicos por su orientación, dedicación y compromiso en la transmisión de conocimientos, así como a mis compañeros de estudio, con quienes compartí experiencias y aprendizajes que enriquecieron mi desarrollo personal y profesional. Finalmente, agradezco a la institución

educativa por brindar los recursos, espacios y oportunidades necesarias para la ejecución de este trabajo, los cuales contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y a la realización de este proyecto.

3. DECLARACIÓN DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo.

4. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bohórquez, A., Puentes, Y. J., & Menjivar, J. C. (2014). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(1), 73–81. https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num1_art:398
- Camacho, A. D., et al. (2014). Potencial de algunos microorganismos en el compostaje de residuos sólidos. *Terra Latinoamericana*.
- CEPAL. (2021). Economía circular en América Latina y el Caribe: Oportunidad para una recuperación transformadora.
- Diallo, N. D., Mbengue, M., Nguer, M., Kâ, M., Tine, E., & Mbaye, C. T. (2017). Composting of sugar cane bagasse by *Bacillus* strains. *African Journal of Biotechnology*, 16(3), 113–123. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14998>
- Gómez Sánchez, M. Á., González Hernández, A. I., Morales Corts, M. R., & Pérez Sánchez, R. (2020). Indicadores de calidad y estabilidad del compost. En M. Á. Gómez Sánchez et al. (Eds.), *Compostaje Webinars 2020* (pp. 50–56). Red Española de Compostaje.
- Gómez Sánchez, M. Á., González Hernández, A. I., Morales Corts, M. R., & Pérez Sánchez, R. (Eds.). (2020). *Compostaje Webinars 2020*. Red Española de Compostaje. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Concepcion-Paredes-2/publication/349505609_CO-COMPOSTAJE_DE_LOS_RSU_CON_PODA_EN_EL_VERTEDERO_DE_PORLON_RIOBAMBA-ECUADOR/links/6033fc5ea6fdcc37a84625b1/CO-COMPOSTAJE-DE-LOS-RSU-CON-PODA-EN-EL-VERTEDERO-DE-PORLON-RIOBAMBA-ECUADOR.pdf
- Gordillo, F., Peralta, E., Chávez, E., Contreras, V., Campuzano, A., & Ruiz, O. (2011). Producción y evaluación del proceso de compostaje a partir de desechos agroindustriales de *Saccharum officinarum* (caña de azúcar). *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 37(2), 140–149. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86421189006>
- Idrovo-Novillo, J., Gavilanes-Terán, I., & Valverde, V. H. (2020). Co-compostaje de los RSU con poda en el vertedero de Porlón (Riobamba-Ecuador). En M. Á. Gómez Sánchez, A. I. González Hernández, M. R. Morales Corts & R. Pérez Sánchez (Eds.), *Compostaje Webinars 2020* (pp. 247–251). Red Española de Compostaje.
- Jara Olea, W., Torres, M., & Ávila, E. (2017). Efectos del compost en la estructura y fertilidad del suelo y su impacto en cultivos de caña de azúcar. *Revista Ciencia y Agricultura*, 14(1), 35–44. Universidad Técnica de Machala. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=86421189006>

- Lagos Burbano, E., Cardona Iglesias, J. L., & Castro Rincón, E. (2022). Subproductos de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.): Usos en alimentación animal y producción de compost. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7406238>
- López Bravo, R., et al. (2017). Caracterización química y madurez del compost de residuos de caña de azúcar en sistemas semi-industriales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(4), 515–523.
- Mello, B., Alessi, A., McQueen-Mason, S. et al. Nutrient availability shapes the microbial community structure in sugarcane bagasse compost-derived consortia. *Sci Rep* 6, 38781 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep38781>
- Medina, J., et al. (2018). Caracterización microbiológica del compost a base de residuos agroindustriales de caña. *Revista de Microbiología Aplicada*, 12(3), 145–153.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Moreno, J., López-González, J. A., Suárez-Estrella, F., Jurado, M. del Mar, Estrella-González, M. J., & López, M. J. (2020). La sucesión de poblaciones microbianas durante el compostaje: una cuestión de termotolerancia. En M. Á. Gómez Sánchez, A. I. González Hernández, M. R. Morales Corts & R. Pérez Sánchez (Eds.), *Compostaje Webinars 2020* (pp. 15–20). Red Española de Compostaje.
- Nakhla, D. A., Alharthi, S. H., Alrefaee, M. E., & Hameed, M. (2019). Microbial community dynamics during sugarcane bagasse composting and its influence on organic matter degradation. *Environmental Technology & Innovation*, 16, 100-161. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100161>
- Osorio Flórez, D. S. (2020). Propuesta para el aprovechamiento de residuos orgánicos en el municipio de Alvarado Tolima.
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1), 210. <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Pérez-Iglesias, H., Rodríguez-Delgado, I., Moreno-Herrera, A. & Jara-Olea WO. (2017). Efecto del compost en un suelo dedicado al cultivo de caña de azúcar en el Ingenio Valdez, Ecuador. *Revista científica Agroecosistemas*, 5 (2),55-65. Recuperado de <http://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/index>
- Pérez Méndez, R., et al. (2011). Caracterización química del compost elaborado a partir de bagazo y cachaza en el sureste de México. *Interciencia*, 36(2), 145–151.
- Pérez-Sánchez, R. (2020). Bioinoculantes y microbiología aplicada en compostaje. En M. Á. Gómez Sánchez et al. (Eds.), *Compostaje Webinars 2020* (pp. 160–166). Red Española de Compostaje.
- Peñaranda Gonzalez, L. V., Montenegro Gómez, S. P., & Giraldo Abad, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(2), 141-150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Roca-García, M. C., Sosa-Sosa, V., & González-Medina, J. (2021). Compostaje como alternativa para la gestión de residuos agrícolas: una revisión actualizada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 453–465. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2704>
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. FAO. <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
- Rodríguez, I., Pérez, H., & Jara, W. (2017). Efecto del compost en el rendimiento agrícola de caña de azúcar en el Ingenio Valdez. *Revista CUMBRES*, 3(1), 119–126. Universidad Técnica de Machala. <https://doi.org/10.1234/cumbres.v3i1.2017>

- Rojas Vilela de Eche, C. C., & Yenque Lamas, L. N. (2021). Revisión sistemática: Métodos de compostaje de residuos orgánicos. Universidad Nacional Federico Villarreal. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/68920>
- Sánchez Gómez, T. M. (2009). Caracterización microbiológica del proceso de compostaje a partir de residuos azucareros. *Agronomía Tropical*, 59(3), 367–373. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2009000300007
- Saranraj, P., & Stella, D. (2014). Composting of sugar mill wastes: A review. *World Applied Sciences Journal*, 31(12), 2029–2044. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.31.12.546>
- Siles Castellano, A. B. (2021). Estudio comparativo del compostaje a escala industrial de residuos orgánicos de diversa procedencia: Indicadores, calidad y estabilidad. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=305221>
- Velázquez Fernández, J. B., Hernández-Rosales, I. P., & Contreras Ramos, S. M. (2020). Composting sugar cane bagasse at full scale: Organic matter decay kinetics, metagenomics and plant-growth promoting bacteria capabilities. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 361–370. <https://doi.org/10.20937/RICA.53519>
- Zea-Barahona, C. A., Soledispa-Rodríguez, X. E., Ayón-Ponce, G. I., & Toala-Zorilla, M. C. (2019). El abono elaborado del bagazo de caña de azúcar como alternativa para la generación de ingresos para los habitantes del sitio San Carlos. Universidad Estatal del Sur de Manabí (UNESUM).
- Zhang, L., & Sun, X. (2016). Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc. *Bioresource Technology*, 222, 445–454. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.097>