

**Factibilidad De Una Biorrefinería Para la Valorización de Biomasa Lignocelulósica
Residual en Latinoamérica: Revisión Sistemática**

Estudiantes:

Silvia Natalia Patiño Duran y Juan Rafael Salcedo Cuestas

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Cesar Augusto Guevara Lastre

Ing. Químico (C)

Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Universidad Industrial De Santander

Faculta de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Primero quiero agradecerle a Dios, a pesar de que no sea muy devoto siempre sentí que alguien siempre estuvo ahí cuando lo necesite.

Quiero agradecer a la única mujer que nunca dejo de creer en mí, que siempre me apoyo en todos mis sueños y todas mis decisiones, la única persona que nunca me juzgo a pesar de mis errores, la que hizo lo imposible porque yo fuera a estudiar todos los días, mi mamá María Agustina Cuestas Romero.

A mi papá Florentino Salcedo Salcedo el hombre que más admiro en este mundo, porque a pesar de que tuvieras mil preocupaciones encima siempre andabas con una sonrisa, nunca olvidare todas tus enseñanzas, gracias por todas esas palabras de aliento que siempre llegaban en el mejor momento.

A todos mis hermanos Alexandra, Edison, Sebastián y Miguel, que, a pesar de los problemas, siempre podía contar con ellos, gracias por apoyar siempre mis sueños y mis locuras.

A mis sobrinos Juan Manuel y Daniel Moisés, espero haberles enseñado que nada es imposible con suficiente fuerza de voluntad.

A mi segunda familia Natas, Nicolas, Jared y Vale, gracias por apreciarme así tal cuál soy, por siempre brindarme una mano las veces que la necesite, por hacerme sentir como en casa, gracias por todas las sonrisas y los recuerdos, fueron años maravillosos.

A mi compañera de tesis/roomie/hater/mejor amiga/ hermana de la vida Silvia Natalia Patiño Duran gracias por siempre ser mi refugio, mi lugar seguro, gracias por nunca dejarme solo siempre que lo necesite, fueron 7 años llenos de preocupaciones y trasnochos por salvar cada materia, pero nunca faltaron las risas.

A mi amiga Daniela Vanegas que, a pesar de estar lejos en este camino, siempre estuvo apoyándome, escuchándome y aconsejándome desde la distancia.

A la Sra. Ceila, la Sra. Carmen y la Sra. Rubiela por abrirme las puertas de su casa y tratarme como si fuera uno más de su familia.

Juan Rafael Salcedo Cuestas

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y compañía.

A mi abuela, la persona que me ha enseñado que soy capaz de alcanzar cualquier meta; gracias por tu apoyo incondicional y por esos consejos que, con amor, me han convertido en quien soy.

A mi mamá, por sus palabras de aliento y por brindarme ese amor incondicional que siempre demuestra a su manera única.

A mi tía Natalia, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento; gracias por ser ese refugio constante y recordarme que nunca estoy sola cuando necesito ayuda.

A mi tía Paulina, por estar siempre dispuesta a escucharme. Gracias por sus consejos sinceros, que me han permitido ganar confianza en mí misma y ampliar mis horizontes.

A Nicolás y Omar, porque su presencia me impulsa a seguir adelante para demostrarles que, con esfuerzo, siempre es posible alcanzar nuestras metas.

A Natalia, mi mejor amiga e incondicional, por escucharme siempre y ofrecerme su apoyo en todo momento.

A Jimena, por creer en mí y por haber llegado para convertirse en una voz de aliento y en una presencia valiosa.

A Brayan, por acompañarme desde el inicio de esta etapa y por estar presente a lo largo de todo este camino. Gracias por tu apoyo constante, tu paciencia, tu comprensión y tu cariño sincero. Gracias por ser un refugio en los momentos difíciles, por darme ánimo cuando más lo necesitaba y por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba.

A Rafael mi mejor amigo, el hermano que la vida me regalo, a quien conocí en Química II y que desde entonces siempre estuvo presente, gracias por su apoyo incondicional, por las noches de estudio y por estar en las buenas y en las malas. Su cariño, lealtad y sinceridad fueron fundamentales para culminar este proceso; gracias por hacer el camino más fácil.

A mi papá y a mi abuelo, que, aunque no estén físicamente, viven en cada logro y en cada paso que doy.

Silvia Natalia Patiño Durán

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la formación académica, los espacios y las herramientas necesarias para nuestro crecimiento profesional y personal a lo largo de este proceso. Esta institución representó no solo un lugar de aprendizaje, sino también un segundo hogar que hizo posible el desarrollo de estas personas.

Al profesor Cesar Augusto Guevara Lastre, director de esta tesis, expresamos nuestro más sincero agradecimiento por su orientación, disposición, acompañamiento y valiosos aportes durante el desarrollo de la investigación. Su experiencia, compromiso y apoyo fueron fundamentales para fortalecer este trabajo y culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

Silvia Natalia Patiño Duran y Juan Rafael Salcedo Cuestas

Tabla de contenido

Introducción	12
Estado del arte.....	14
1. Objetivo general.....	17
1.1 Objetivos específicos	17
2. Metodología.....	18
2.1 Búsqueda bibliográfica en bases de datos electrónicas.....	18
2.2 Selección y revisión de los documentos	19
2.3 Análisis e identificación de tecnologías.....	20
3. Resultados y discusión.....	20
3.1 Análisis bibliométrico.....	22
3.2 Biomasa lignocelulósico residual	26
3.2.1 Biomasa de origen agrícola.....	27
3.2.2 Biomasa origen agroindustrial	29
3.2.3 Biomasa origen forestal	31
3.3 Biorrefinerías	32
3.3.1 Cadena de Producción.....	33
3.4 Pretratamientos	38
3.5 Rutas de conversión	41
3.6 Madurez tecnológica en la matriz.....	42

4. Desafíos para la consolidación y escalamiento de las biorrefinerías.....	44
5. Implicaciones y perspectivas para el contexto colombiano.....	45
6. Conclusiones.....	48
Referencias Bibliográficas.....	50
Apéndices.....	71

Lista de tablas

Tabla 1 Resultados obtenidos de búsqueda sin criterios.....	20
Tabla 2 Resultados obtenidos de búsqueda con criterios.....	21

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de la Metodología	18
Figura 2 Distribución según la fuente o plataforma.....	23
Figura 3 Distribución por países	24
Figura 4 Distribución por años	25
Figura 5 Mapa de concurrencia.....	26
Figura 6 Rutas de Conversión.....	41

Lista de Apéndices

Apéndice A. Protocolo PRISMA	71
Apéndice B. Componentes Biomasa.....	75
Apéndice C. Rutas de conversión	77

Resumen

Título: Factibilidad De Una Biorrefinería Para la Valorización de Biomasa Lignocelulósica Residual en Latinoamérica: Revisión Sistemática*.

Autores: Silvia Natalia Patiño Duran, Juan Rafael Salcedo Cuestas y Cesar Augusto Guevara Lastre**.

Palabras Clave: biorrefinería, biomasa lignocelulósica residual, bioeconomía, revisión sistemática, factibilidad, Colombia.

Descripción: La valorización de biomasa lignocelulósica residual mediante esquemas de biorrefinería representa una alternativa estratégica para diversificar la matriz energética, promover la bioeconomía circular y reducir la dependencia de combustibles fósiles. En este trabajo se evaluó la factibilidad de implementar una biorrefinería basada en biomasa residual en Latinoamérica a partir de una revisión bibliográfica. La investigación se desarrolló siguiendo los lineamientos de la guía PRISMA, mediante búsquedas en Scopus y Web of Science para el periodo 2016-2025. A partir de 985 registros iniciales, y tras aplicar criterios de selección, depuración y revisión de contenido completo, se consolidó una base final de 130 artículos para el análisis cualitativo y comparativo. La revisión evidenció que las biomásas más recurrentes corresponden al rastrojo de maíz, residuos de caña de azúcar, residuos de palma, pajas de cereales y cascara. Asimismo, se identificó junto a los análisis económicos y ambientales los puntos más críticos de la cadena de producción de una biorrefinería, los cuales fueron el suministro de biomasa, el pretratamiento, la conversión, la valorización de productos y el tratamiento de corrientes residuales. Aunque la literatura reporta numerosas evaluaciones tecnoeconómicas y ambientales, la madurez tecnológica observada sigue siendo heterogénea y en muchos casos predominantemente analítica. Para el contexto colombiano, la revisión sugiere que existe una base académica y técnica favorable, pero persisten barreras asociadas al escalamiento, la infraestructura, la articulación institucional y la necesidad de evaluaciones más integrales de toda la cadena de valor.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Cesar Augusto Guevara Lastre. Magister en Ciencias y Tecnologías Ambientales.

Abstract

Title: Feasibility of a Biorefinery for the Valorization of Residual Lignocellulosic Biomass in Latino American: A Systematic Review*.

Authors: Silvia Natalia Patiño Duran, Juan Rafael Salcedo Cuestas y Cesar Augusto Guevara Lastre**.

Keywords: biorefinery, residual lignocellulosic biomass, bioeconomy, systematic review, feasibility, Colombia.

Description: The valorization of residual lignocellulosic biomass through biorefinery schemes represents a strategic alternative to diversify the energy matrix, promote the circular bioeconomy, and reduce dependence on fossil fuels. This study evaluated the feasibility of implementing a biorefinery based on residual biomass in Latino American through a literature review. The research was conducted following the PRISMA guidelines, through searches in Scopus and Web of Science for the 2016–2025 period. From an initial 985 records, and after applying selection, screening, and full-text review criteria, a final database of 130 articles was consolidated for qualitative and comparative analysis. The review showed that the most recurrent biomasses correspond to corn stover, sugarcane residues, palm residues, cereal straws, and peels. Likewise, together with the economic and environmental analyses, the most critical points in the production chain of a biorefinery were identified, namely biomass supply, pretreatment, conversion, product valorization, and residual stream treatment. Although the literature reports numerous technological and environmental assessments, the observed technological maturity remains heterogeneous and, in many cases, predominantly analytical. For the Colombian context, the review suggests that there is a favorable academic and technical basis; however, barriers related to scale-up, infrastructure, institutional articulation, and the need for more integrated evaluations across the whole value chain.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Sciences, School of Chemical Engineering. Supervisor: Cesar Augusto Guevara Lastre, M.Sc. in Environmental Sciences and Technologies.

Introducción

En las últimas décadas, la creciente demanda de combustibles fósiles ha generado impactos ambientales negativos a escala global, como el cambio climático, la contaminación del aire y la degradación ambiental (Speight & Singh, 2014). Frente a esta situación, surgen los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) propuestos por la ONU para el 2030 entre los cuales destacan el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), el ODS 12 (Producción y consumo responsables) y el ODS 13 (Acción por el clima) (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015). En este marco, Colombia promulgó la ley 2099 de 2021, la cual integró nuevas fuentes de producción energética, como la biomasa, al sistema energético nacional.

En este contexto, las biorrefinerías surgen como una alternativa estratégica alineada con los ODS, ya que permiten la conversión integral de biomasa en productos de valor agregado como biocombustibles, bioplásticos y compuestos químicos de interés industrial (Segatto et al., 2022). Uno de los principales retos de esta industria hoy en día es lograr una producción rentable y competitiva de sus productos (Patel et al., 2025), porque, a diferencia de las refinerías convencionales, las biorrefinerías son sistemas complejos en los que la biomasa, según su origen, presenta composiciones muy variadas y, por ende, puede emplearse para obtener más de un producto (Ubando et al., 2020).

Este enfoque se conoce como producción en cascada, en el cual la biomasa se aprovecha al menos una vez para obtener productos de alto valor o servicios, antes de destinarse al compostaje o a la conversión energética (Carus & Dammer, 2018; Segatto et al., 2022; Ubando et al., 2020). Frente a esta problemática, surge la necesidad de realizar una revisión sistemática de la literatura científica que permita evaluar las tecnologías más relevantes actualmente, así como los modelos

de integración existentes que consideren la factibilidad técnica, económica y ambiental para implementar biorrefinerías basadas en biomasa residual en Colombia. En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Es factible implementar una biorrefinería basada en biomasa residual en Latinoamérica?

Estado del arte

Diversos estudios han abordado el diseño y la evaluación de biorrefinerías a partir de biomasa residual, destacando su potencial para la producción de insumos de valor agregado, biocombustibles y energía, bajo esquemas de economía circular y sostenibilidad (Carus & Dammer, 2018; Patel et al., 2025; Segatto et al., 2022). A nivel internacional, en Suecia, Muneer desarrolló un estudio de prefactibilidad sobre el uso de biomasa verde de trigo sarraceno, facelia, cáñamo y colza, sembrados como cultivos intercalados (IC), empleándolos como materia prima para obtener concentrados ricos en proteínas y productos destinados a la alimentación animal. Para ello, se aplicaron métodos de desintegración, extracción y separación orientados a aislar la fibra contenida en el material lignocelulósico y facilitar su aprovechamiento posterior. Los resultados del estudio evidencian que la biomasa de IC podría constituir una fuente valiosa para la producción de insumos proteicos, contribuyendo así a generar ingresos adicionales para los agricultores (Muneer et al., 2021).

En el caso de América Latina y el Caribe (ALC), aunque se han desarrollado iniciativas para convertir residuos orgánicos en energía, la viabilidad de las biorrefinerías aún enfrenta múltiples desafíos. Estos sistemas requieren procesos complejos, como el aprovechamiento en cascada de la biomasa, además de altos costos de inversión y mantenimiento que limitan su implementación a gran escala. A ello se suman deficiencias en políticas públicas, marcos regulatorios poco claros, falta de incentivos financieros y escasa capacidad tecnológica e investigativa en la región, lo que ha impedido consolidar proyectos competitivos frente a los combustibles fósiles de bajo costo. Asimismo, la carencia de datos confiables sobre volúmenes y composición de residuos, junto con la ausencia de empresas locales capaces de fabricar equipos especializados, sigue siendo una barrera para el desarrollo de estas tecnologías (Janssen & Rutz, 2011).

Un ejemplo de esta situación se observa en Chile, Santander llevó a cabo un estudio de prefactibilidad técnico-económica para la instalación de una biorrefinería en la región de O'Higgins, utilizando residuos de maíz como materia prima. El análisis contempló el diseño de una planta productora de bioetanol y la evaluación de coproductos como levadura, lignina, energía y xilitol, concluyendo que el proyecto solo sería viable si se asegura un financiamiento estatal cercano al 84 % (Santander et al., s. f.). Otro caso más ilustrativo es en México, donde se inauguró una planta de digestión anaerobia para procesar residuos de nopal y vegetales, la cual tiene la capacidad para generar aproximadamente 106 m³ de biogás diarios, que demuestra el potencial de aprovechamiento de los residuos agrícolas en la región. Sin embargo, su escalamiento sigue condicionado por las limitaciones económicas y técnicas que caracterizan a la región (Silva-Martínez et al., 2020).

En Colombia, la situación es relativamente más favorable en el ámbito de los biocombustibles, dado que el país cuenta con un mercado establecido desde hace más de una década (Vega et al., 2024), cuya producción proviene en su mayoría de la industria del aceite de palma. Boom-Cárcamo analizó esta cadena productiva y evidenció que cerca del 90 % de la biomasa generada corresponde a residuos (racimos vacíos, fibras, cuescos y efluente de molino), los cuales pueden aprovecharse en la generación de calor y electricidad (Boom-Cárcamo et al., 2025). De igual manera, diferentes estudios han mostrado el potencial de la digestión anaerobia para valorizar residuos orgánicos bajo distintas configuraciones operativas. Mientras Rodríguez reportó altos rendimientos de metano mediante la integración de estiércol porcino, fracción orgánica de residuos sólidos municipales y residuos de cacao (Aura Rodríguez et al., 2017), Jaimes-Estévez et al. demostraron, en un biodigestor tubular de bajo costo operado durante ocho años bajo condiciones psicrófilas un biogás con un contenido de metano de aproximadamente 63.1 % (Jaimes-Estévez et al., 2020)

evidenciando que la digestión anaerobia también puede mantener un desempeño estable en condiciones reales de operación cuando existe adaptación microbiana al sistema. No obstante, a pesar de la abundancia de estos recursos y de numerosos estudios, la consolidación de biorrefinerías en el país continúa limitada por los altos costos de inversión y la falta de incentivos regulatorios, problemática que se replica en otros países de América Latina y el Caribe (Silva-Martínez et al., 2020).

No obstante, los estudios evidencian que las biorrefinerías de biomasa residual son una alternativa sostenible para producir productos de alto valor, energía y biocombustibles, reduciendo emisiones y diversificando la matriz energética. Además, impulsan la valorización de residuos y el desarrollo económico local bajo esquemas de bioeconomía circular adaptados a cada región.

1. Objetivo general

- Evaluar la factibilidad de una biorrefinería para la valorización de biomasa lignocelulósica residual en Latinoamérica mediante una revisión sistemática.

1.1 Objetivos específicos

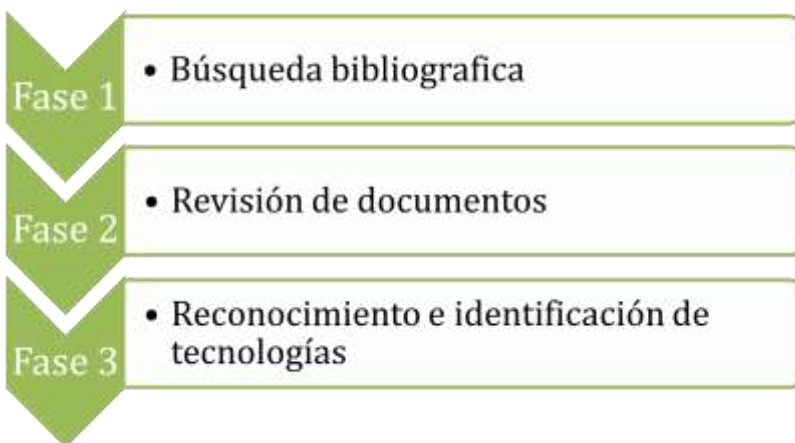
- Aplicar el protocolo PRISMA como guía metodológica en la revisión sistemática.
- Realizar un análisis bibliométrico de las tecnologías implementadas en las biorrefinerías.
- Evidenciar los desafíos actuales relacionados con las tecnologías en desarrollo de biorrefinerías en Colombia.

2. Metodología.

Este estudio se desarrolló como una revisión sistemática, siguiendo los lineamientos de la guía metodológica PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses*). La revisión se orientó en identificar avances tecnológicos, oportunidades de valorización y limitaciones asociadas a la implementación de biorrefinerías basadas en biomasa residual en Colombia. Sin embargo, debido a la diferencia de los estudios incluidos en cuanto a objetivos, metodologías y variables analizadas, no se realizó metaanálisis; en su lugar, se efectuó una síntesis cualitativa y comparativa de la información. La metodología general empleada se presenta en la Figura 1.

Figura 1

Diagrama de la Metodología



2.1 Búsqueda bibliográfica en bases de datos electrónicas.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Science (WOS), las cuales fueron seleccionadas por su amplia cobertura de literatura científica y por su acceso institucional a través de la Universidad Industrial de Santander. La búsqueda se limitó a artículos científicos de acceso abierto, en idioma español e inglés y publicados entre los años 2016 y 2025.

Para la construcción de la estrategia de búsqueda se emplearon palabras clave relacionadas con el objeto de estudio, entre ellas: “biorrefinería”, “análisis tecnoeconómico”, “estudio

económico”, “biomasa”, “material lignocelulósico”, “residuos agroindustriales”, “Latinoamérica”, “economías emergentes” y “Suramérica”, combinadas mediante los operadores booleanos AND y OR.

2.2 Selección y revisión de los documentos

Una vez obtenidos los resultados de búsqueda, los registros fueron exportados al software Zotero para su organización, depuración y eliminación de duplicados. Posteriormente, los documentos fueron sistematizados en una hoja de cálculo de Excel, en la cual se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión en tres etapas: revisión de título, revisión de resumen y revisión de contenido completo.

En la primera etapa, se seleccionaron los artículos con títulos que estuvieran relacionados con al menos dos de los siguientes aspectos: análisis económico o tecnoeconómico de biorrefinerías, uso de biomasa residual lignocelulósica presente en Colombia, tecnologías de conversión potencialmente aplicables en el contexto colombiano, y obtención de biocombustibles, energía o productos de valor agregado.

En la segunda etapa, se analizaron los resúmenes para descartar estudios que no abordaran de forma directa la factibilidad tecnológica o económica del tema. Finalmente, en la tercera etapa, se revisó el texto completo de los documentos seleccionados con el fin de verificar su pertinencia, confiabilidad y potencial de implementación en Colombia.

Los artículos incluidos se organizaron en una base de datos en Excel, registrando variables de interés como palabras clave, tipo de biomasa, tecnología de conversión, productos obtenidos y principales conclusiones relacionadas con la viabilidad del proceso o su análisis económico.

2.3 Análisis e identificación de tecnologías

Con base en la información recopilada, se realizó el reconocimiento de las principales tecnologías de conversión, así como de los avances, desafíos y aspectos clave asociados al desarrollo de biorrefinerías a partir de biomasa residual. A partir de este análisis, se identificaron las biomásas, productos y procesos con mayor factibilidad de implementación en Colombia, de acuerdo con la evidencia reportada en la literatura. Asimismo, se establecieron elementos relevantes que pueden orientar futuras investigaciones en este campo.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos tras la exploración en los motores de búsqueda sin los criterios propuestos en la metodología se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Resultados obtenidos de búsqueda sin criterios

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
SCOPUS	<i>TITLE-ABS-KEY (biorefin*) AND TITLE-ABS-KEY ("waste biomass" OR resid* OR lignocellulosic*) AND (feasib* OR techno*economic* OR sustainab*) AND ("Colombia" OR "Latin America" OR "South America" OR "developing countries" OR "emerging economies")</i>	606
WOS	<i>TS=(biorefinery OR "bio-refinery"OR "bio refinery") AND TS=("techno-economic analysis" OR "feasibility study") AND TS=(biomass OR "residual biomass" OR "biomass waste" OR residues OR "agricultural residues" OR "crop residues" OR "agro-industrial waste" OR "organic waste" OR "lignocellulosic biomass")</i>	379
Total		985

Como resultado de la estrategia de búsqueda implementada en las dos bases de datos, se identificó un total de 985 publicaciones encontradas sin aplicar los criterios vistos en la metodología, teniendo en cuenta esto, se procede a presentar Tabla 2 la cual aplica los criterios.

Tabla 2*Resultados obtenidos de búsqueda con criterios*

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
SCOPUS	TITLE-ABS-KEY (biorefin*) AND TITLE-ABS-KEY ("waste biomass" OR resid* OR lignocellulosic*) AND (feasib* OR techno*economic* OR sustainab*) AND ("Colombia" OR "Latin America" OR "South America" OR "developing countries" OR "emerging economies")	130
WOS	TS=(biorefinery OR "bio-refinery"OR "bio refinery") AND TS=("techno-economic analysis" OR "feasibility study") AND TS=(biomass OR "residual biomass" OR "biomass waste" OR residues OR "agricultural residues" OR "crop residues" OR "agro-industrial waste" OR "organic waste" OR "lignocellulosic biomass")	139
Total		269

Con los nuevos criterios los cuales consisten en únicamente artículos científicos publicados después del año 2015, con acceso abierto, en idioma inglés o español hay un total de 269 publicaciones encontradas con las ecuaciones de búsquedas.

Los 269 fueron descargados en formato “. ris” lo cual es posible en ambas bases de datos con el fin de ser exportados al gestor bibliográfico Zotero, allí se llevó a cabo un proceso de depuración adicional, mediante la detección automática de registros duplicados, los cuales fueron verificados y fusionados manualmente. Como resultado de esta consolidación, se obtuvo un total de 261 artículos únicos, los cuales fueron exportados a un documento excel donde contiene el título del artículo, autor(es), año de publicación y el DOI, el cual constituyen la base documental final para el análisis bibliométrico y la revisión sistemática.

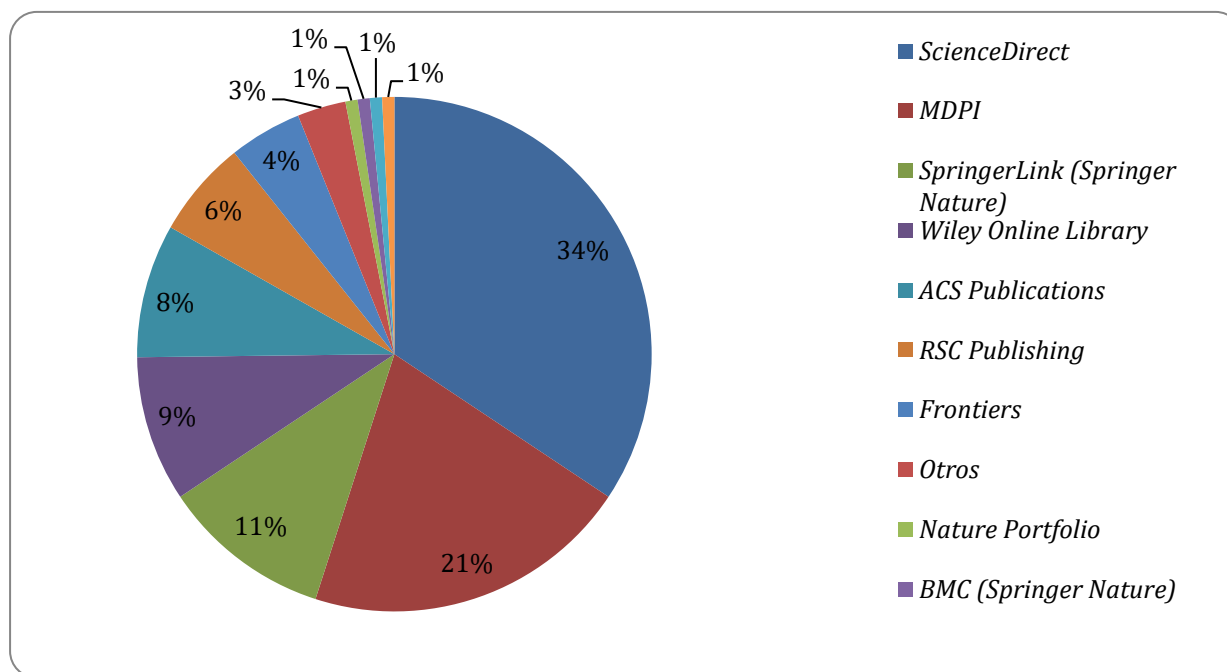
En la segunda fase, se llevó a cabo un proceso de cribado mediante la revisión de títulos en donde hubo una reducción de 35 artículos en este primer filtro, quedando un total 226 artículos. Luego se realizó la lectura del resumen de cada artículo, para luego descartar los que no tuvieran una relación directa con el tema, con los cuales se descartaron 52 artículos para un total de 174.

En la tercera fase se realizó la lectura completa de los 174 artículos, de los cuales se descartaron 34 que utilizaban cultivos energéticos o procesaban residuos municipales únicamente porque se observó que sus composiciones son diferentes por lo tanto su tratamiento también lo es, además se descartaron 4 artículos que funcionaban como un tipo de análisis bibliográficos, por último se eliminaron 6 más porque a pesar de que trataran del tema a interés, su datos o problemas se enfocaban estrictamente en esa región, siendo difícil utilizar estos datos, quedando un resultado de 130 artículos finales para la revisión sistemática.

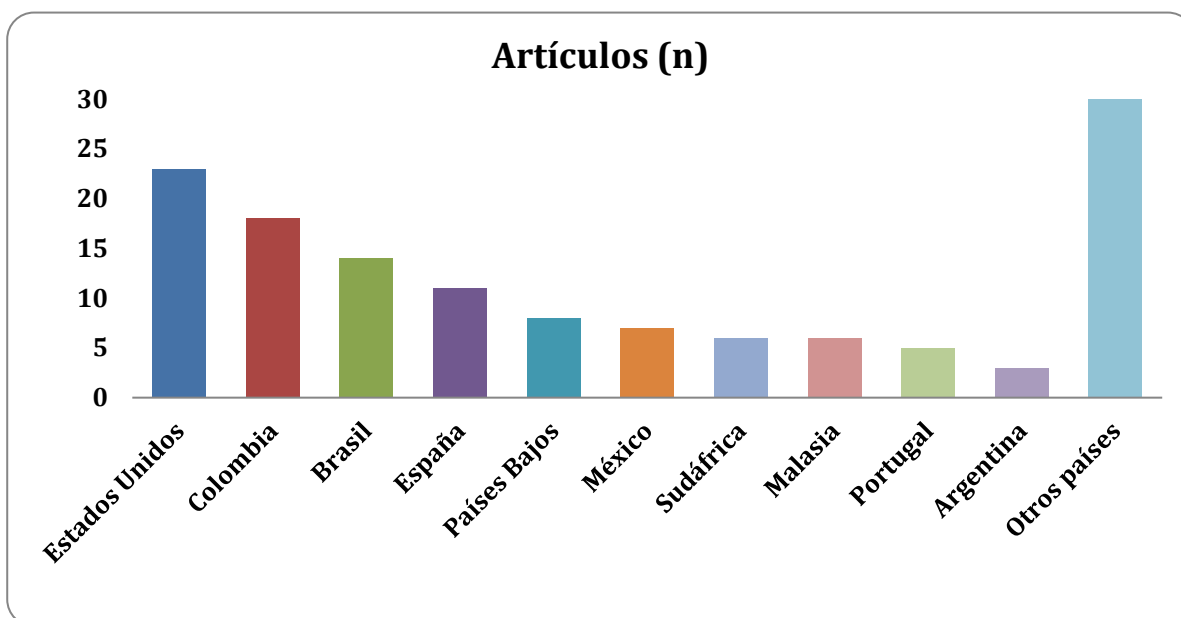
3.1 Análisis bibliométrico

La información bibliográfica de la matriz final se consolidó y depuró en microsoft excel, registrando para cada publicación variables como autores, año de publicación, título, DOI, revista, fuente/plataforma de consulta y país de afiliación reportado en el artículo. Con base en esta sistematización, se realizó el análisis bibliométrico sobre 130 artículos, con el fin de identificar patrones de publicación y concentración temática.

La Figura 2 presenta la distribución de los artículos según la fuente o plataforma de publicación. Se observa una marcada concentración en *ScienceDirect*, con 45 artículos (34.35 %), seguida de MDPI (*Multidisciplinary Digital Publishing Institute*), con 27 artículos (20.61 %).

Figura 2*Distribución según la fuente o plataforma*

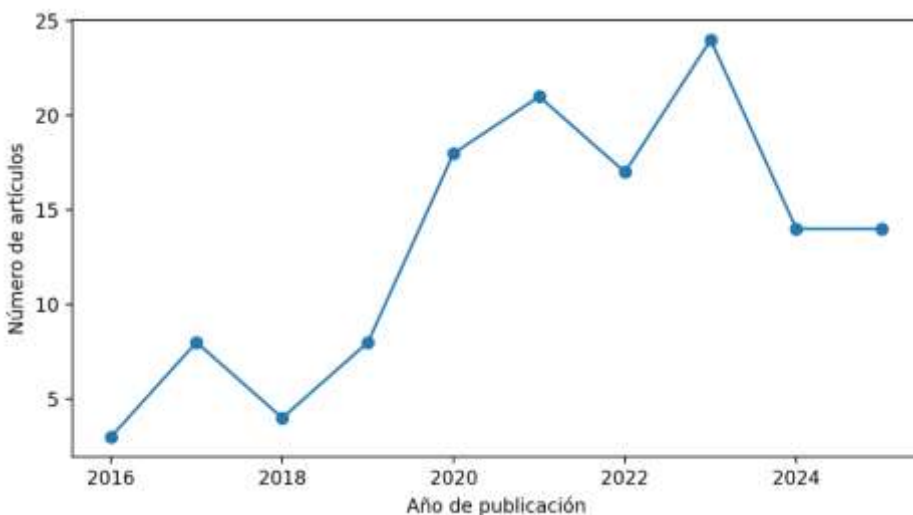
Por otra parte, la Figura 3 muestra los países en los que se publicaron los artículos revisados. Estados Unidos se destaca con el mayor número de publicaciones, correspondiente al 17.56 % (n = 23), seguido de Colombia, con 13.74 % (n = 18), y Brasil, con 10.69 % (n = 14). Esta distribución refleja mayor concentración de publicaciones en países con desarrollo activo en biorrefinería, bioenergía y valorización de biomasa residual. No obstante, la categoría “Otros países” también evidencia el alcance internacional de este campo de investigación.

Figura 3*Distribución por países*

La Figura 4 muestra el número de publicaciones aumentó de forma general entre 2016 y 2023, con su valor más alto en 2023 (24 artículos). A partir de 2024 se observa una disminución, aunque la cantidad de trabajos sigue siendo mayor que en los primeros años del periodo analizado. En conjunto, estos resultados evidencian un mayor interés investigativo en el tema, especialmente desde 2020.

Figura 4

Distribución por años



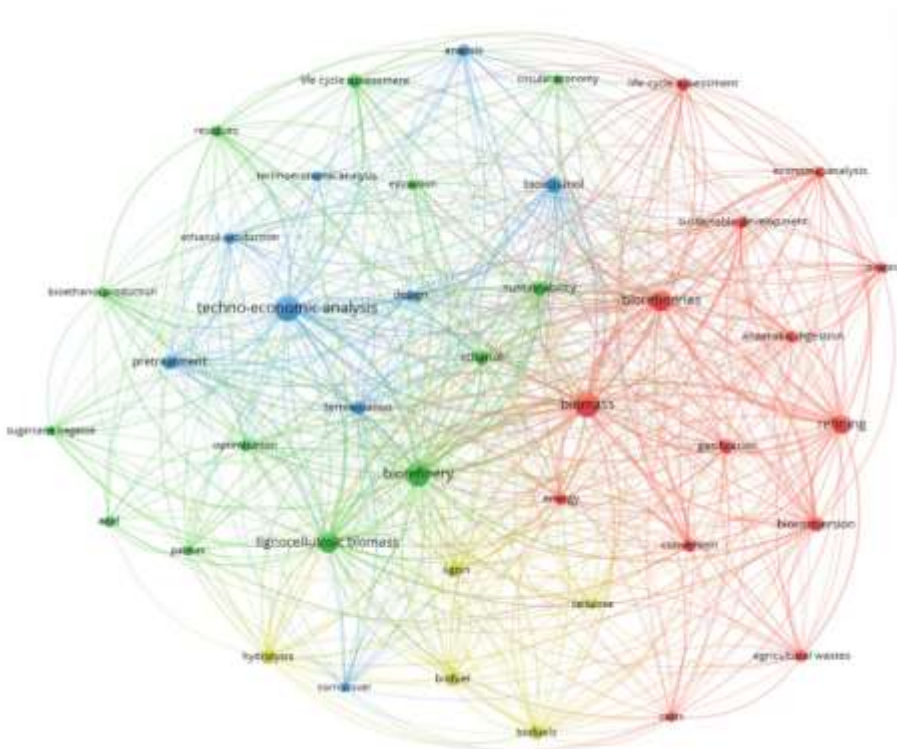
Finalmente, la Figura 5 presenta el mapa de coocurrencia de palabras clave construido a partir de los artículos revisados, el cual permite identificar las principales líneas temáticas y sus relaciones dentro del campo de estudio. En este mapa se observa que los términos con mayor frecuencia y centralidad son *biomas*, *biorefinery*, *bioethanol*, *sustainability*, *techno-economic analysis* y *life cycle assessment*, lo que refleja que la investigación reciente se ha centrado principalmente en la valorización de biomasa bajo el enfoque de biorrefinerías sostenibles.

El análisis de agrupamiento permitió identificar cuatro clústeres principales, cada uno asociado con un enfoque específico de investigación en biorrefinerías. El clúster rojo se relaciona con la evaluación tecnoeconómica y la sostenibilidad de los procesos, mientras que el azul agrupa términos vinculados con la caracterización y transformación bioquímica de la biomasa lignocelulósica. Por su parte, el clúster verde se asocia con las rutas de conversión y el aprovechamiento de residuos agrícolas, y el amarillo con la optimización de procesos, la energía y el desarrollo sostenible. En conjunto, esta red de coocurrencia muestra que investigación en

biorrefinerías integra aspectos tecnológicos, económicos y ambientales, lo que confirma el carácter multidisciplinario de este campo.

Figura 5

Mapa de concurrencia



3.2 Biomasa lignocelulósico residual

Aproximadamente se producen 181.500 millones de toneladas al año de biomasa lignocelulósica residual (Prasertsilp et al., 2023) y se espera que aumente a unos 826 millones de toneladas secas para 2040 (Ganguly et al., 2022), es allí donde radica su interés por la abundancia de este y porque no compite directamente con la producción de alimentos, esta biomasa se define como el conjunto de materiales orgánicos generados como subproductos o desechos principalmente de 3 sectores (Rodríguez-Valderrama, Escamilla-Alvarado, Rivas-García, et al., 2020), origen agrícola (Becerra-Pérez et al., 2022; Ortiz-Sánchez et al., 2024), de origen

agroindustrial (Almeida et al., 2023) (Agraso-Otero et al., 2025) y Finalmente de origen forestal (Carmo-Calado, Mota-Panizio, et al., 2023).

Pese a compartir naturaleza lignocelulósica, estos residuos difieren en contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina, cenizas y humedad, lo que condiciona su recalcitrancia y, por tanto, la selección de pretratamientos y rutas de conversión. Por ello, la biomasa lignocelulósica residual no debe entenderse como un material único, sino como una familia de materias primas cuya heterogeneidad debe considerarse desde el diseño del proceso; una síntesis de composiciones reportadas se presenta en el Apéndice B (Vollmer et al., 2022),(Carmo-Calado, Hermoso-Orzáez, et al., 2023; Piedrahita-Rodríguez et al., 2024).

A continuación, se detalla los tres tipos de biomasa según su origen, cabe aclarar que no todos los estudios utilizan solo un tipo de residuos o en algunos casos no especifican el tipo de residuos porque su enfoque radica en otro aspecto.

3.2.1 Biomasa de origen agrícola

A partir de la revisión de la matriz bibliográfica, se observa que las biomásas de origen agrícola constituyen uno de los grupos más relevantes dentro de los estudios analizados sobre biorrefinerías, particularmente en países con regiones agrícolas como Colombia (Ortiz-Sánchez et al., 2024), Brasil (Watanabe et al., 2020) o México (Dudek et al., 2025). Según (Becerra-Pérez et al., 2022) estima que se producen cinco mil millones de toneladas de residuos agrícolas totales en el mundo. Asia es el mayor productor, con el 47 % del total, seguida de América (29 %), Europa (16 %), África (6 %) y finalmente Oceanía (2 %). Diversos estudios coinciden en que esta biomasa representa una oportunidad estratégica para la transición hacia esquemas de bioeconomía, siempre que su valorización considere las condiciones técnicas, económicas y territoriales del contexto local (Cardona-Alzate et al., 2025).

Dentro del conjunto de artículos analizados, el rastrojo de maíz es la materia prima más recurrente y aparece asociado a estudios de pretratamiento, logística, sostenibilidad y producción de bioetanol, butanol, hidrógeno y metano, lo que confirma su relevancia como residuo de interés global (Baral & Shah, 2017; Becerra-Pérez et al., 2022; Correia et al., 2024; Pang et al., 2021; Patrizi et al., 2020; Rodríguez-Valderrama, Escamilla-Alvarado, Rivas-García, et al., 2020). Por otro lado, los residuos de caña de azúcar, la literatura también evidencia su versatilidad para producir biocombustibles y productos de valor agregado (Brondi et al., 2020; N. Clauser et al., 2023; Gadkari et al., 2023; Kasperski et al., 2025; Louw et al., 2023; Ortiz-Sánchez et al., 2024; Pinheiro et al., 2025; C. Santos et al., 2018) además de su importancia para Colombia por la magnitud de esta cadena productiva (Burbano-Cuasapud et al., 2023, 2023; Louw et al., 2023; Ortiz-Sánchez et al., 2024; Piedrahita-Rodríguez et al., 2024; Wiranarongkorn et al., 2023)

Otro subconjunto ampliamente representado corresponde a pajas de cereales, particularmente la paja de arroz se relaciona con estudios que resaltan su potencial de aprovechamiento. En Colombia se genera este residuo en grandes cantidades, debido a que se estima que la producción de arroz es de 5.7 millones de toneladas al año (Cañon et al., 2022), asimismo se han evaluado las rutas de gasificación y pirolisis para evaluar su viabilidad tecnoeconómica (Quintero-Naucil et al., 2024).

Adicionalmente, la matriz incluye residuos agrícolas característicos de sistemas tropicales, un ejemplo son los residuos de plátano/banano, en Colombia, se calcula que se produce alrededor de 25 millones de toneladas de este residuo (Gómez et al., 2022). Otro cultivo importante en el contexto latinoamericano es el aprovechamiento de hojas de piña como residuo de la cosecha agrícola para producir biocombustibles (Liao et al., 2022). También aparecen muestra de otras biomásas agrícolas residuales como la cascara de cacao más el estiércol bovino para producir gas

(Ghysels et al., 2020), residuos de la cosecha de girasoles para producir electricidad y gas (Havrysh et al., 2023) o el aprovechamiento de la pulpa de yuca que aproximadamente se produce 302 millones de toneladas de yuca en el mundo y el 10 % de esta biomasa corresponde a la pulpa de yuca, un residuo bastante abundante pero no muy estudiado (Prasertsilp et al., 2023).

3.2.2 Biomasa origen agroindustrial

La biomasa de origen agroindustrial corresponde a residuos generados durante la transformación de materias primas agrícolas. En esta categoría sobresalen los residuos de la industria de palma de aceite, particularmente el racimo vacío de palma (*empty fruit bunch*, EFB), por su alta generación y por su contenido de celulosa y hemicelulosa, características que lo convierten en una de las corrientes más prometedoras para esquemas de biorrefinería en regiones tropicales.(Abdullah et al., 2016; Hafyan et al., 2020).

Otro residuo importante son los producidos por la industria de cervecera compuesto principalmente por el bagazo cervecero o *brewer's spent grain* (BSG), lúpulo gastado y levadura (W. G. Sganzerla et al., 2023), los trabajos analizados muestran varias rutas de valorización. Una de ellas es la biotecnológica, donde el bagazo y la levadura residual son sometidos a hidrólisis enzimática y luego fermentados para producir ácido succínico (Escanciano et al., 2025), otra ruta es la hidrólisis con agua subcrítica, utilizada para fraccionar el BSG y obtener azúcares como arabinosa, galactosa, glucosa, xilosa, fructosa y sacarosa (Voogt et al., 2023); también se identificó la digestión anaerobia como una alternativa energética importante, ya que la co-digestión del BSG con aguas residuales y lodos cerveceros permitió aumentar notablemente la producción de metano (W. G. Sganzerla et al., 2023).

Los residuos tipos cáscaras representan una fracción claramente agroindustrial, ya que se originan después del acondicionamiento o transformación primaria de materias primas agrícolas.

En el caso de los cítricos, la producción mundial se acerca a 124 millones de toneladas al año y, para frutos como la naranja, la fracción residual puede ser bastante grande, ya que las cáscaras, bagazos y semillas pueden representar hasta el 40 % del peso total del fruto (Bedoya Betancur et al., 2021) además se reporta que la producción mundial de naranjas se ubicó alrededor de 76 – 78 millones de toneladas (Ramos & Kempka, 2024). En la industria de la papa también se generan volúmenes importantes, pues la cáscara corresponde aproximadamente al 10 – 12 % del peso del tubérculo (Almeida et al., 2023). En el caso de los cultivos de almendros, la cáscara de este, resalta ya que se estima una generación anual de entre 70 y 150 millones de toneladas a nivel mundial, asociada al alto consumo y procesamiento de almendras; además, en 2019 se registraron cerca de 2.1 millones de hectáreas cultivadas (Sillero et al., 2021). En conjunto, estos trabajos muestran que las cáscaras no deben verse como un residuo secundario, sino como una biomasa agroindustrial con capacidad de transformarse en compuestos de valor agregado dentro de esquemas de economía circular.

Los residuos tipo orujo “*pomace*” son lo sólidos que quedan después de extraer el jugo, por ejemplo, En el caso de la uva, el orujo de uva son un subproducto relevante de las industrias del vino y del jugo, con una generación superior a 3 millones de toneladas al año a escala mundial (Adamovic et al., 2021). En el caso de la baya de aronia, el orujo representa cerca del 20 % de la baya procesada y está constituido sobre todo por pieles, semillas, tallos y partes leñosas (Agraso-Otero et al., 2025), Entrando al contexto colombiano, (Dávila et al., 2017) estudia la pulpa agotada de mora andina que aparece como el principal residuo del procesamiento de jugos, mermeladas y concentrados, se reporta una producción anual de mora en Colombia de 105,285 toneladas en 2013 y señala que alrededor del 20 % de la fruta procesada para jugo termina como residuo. Aunque en

la matriz no haya muchos artículos con este tipo de residuos, en un subproducto abundante de algunas industrias que vale la pena investigar.

3.2.3 Biomasa origen forestal

La tercera gran categoría identificada en la matriz corresponde a la biomasa de origen forestal, entendida como aquella proveniente tanto de operaciones silvícolas como de la transformación industrial de la madera. En este grupo predominan las corrientes leñosas, especialmente los residuos de eucalipto en forma de residuos forestales, chips o aserrín, así como flujos secundarios de la industria de pulpa y papel, que contienen corrientes ricas en lignina (N. Clauser et al., 2023), (Abdelaziz et al., 2020). A diferencia de varias biomásas agroindustriales, estas materias primas suelen presentar mayor contenido de lignina y cadenas de abastecimiento más concentradas, por lo que resultan particularmente atractivas para rutas orientadas a combustibles avanzados, compuestos aromáticos y materiales de mayor valor (Tan et al., 2017).

Además, en la matriz aparecen trabajos que utilizan aserrín de eucalipto como materia prima forestal y lo describen como un subproducto disponible localmente para la obtención de productos de mayor valor agregado (N. Clauser et al., 2023). Asimismo, varios artículos no se limitan a la biomasa forestal sólida, sino que incluyen corrientes ricas en lignina, lo que evidencia que la biorrefinería forestal no depende únicamente de residuos de cosecha o aserrío, sino también de corrientes intermedias ya parcialmente transformadas, con alto potencial para la producción de aromáticos, combustibles y químicos especializados (Obydenkova, Defauw, et al., 2022).

En conjunto, los artículos de origen forestal muestran una transición clara desde el uso convencional de la biomasa leñosa como fuente de calor o energía hacia esquemas de aprovechamiento integral. En lugar de limitarse a la combustión, la literatura reciente plantea su uso como plataforma para biocombustibles avanzados, productos aromáticos, materiales y

compuestos químicos de alto valor agregado (Abdelaziz et al., 2020; Arias et al., 2023; N. Clauser et al., 2023; Lap et al., 2019).

Para terminar se aclara que la economía que nace del uso biomasa residual se llama bioeconomía, (Ortiz-Sánchez & Cardona, 2022) la define como “el uso sostenible de diferentes recursos biológicos renovables y/o su conversión o bioprocesamiento para obtener diversos productos o servicios de alto valor” y el lugar donde ocurre estas transformaciones se llama biorrefinería.

3.3 Biorrefinerías

Una biorrefinería es un concepto de producción para la conversión de biomasa en diferentes productos (Vollmer et al., 2022), una forma de clasificarlas es según el tipo de biomasa con el que se alimenta, se denomina biorrefinerías de primera generación (1G) a aquellas que se alimentan a partir de cereales o cultivos comestibles ricos en azúcares, almidones y (o) grasas, es decir este tipo de biomasa si compite con la producción de alimentos, las biorrefinerías de segunda generación (2G) utilizan biomasa residual lignocelulósica o residuos no comestibles de primera generación. Sin embargo, el mayor problema de este es su compleja estructura química, las de tercera generación (3G) utilizan biomasa acuática (algas y cianobacterias) (N. M. Clauser et al., 2021; Louw et al., 2023; Valdivia et al., 2016).

Dentro de la matriz analizada, el interés se concentra de manera predominante en las biorrefinerías de segunda generación (2G), exceptuando algunos casos, que aparecen biorrefinerías integradas 1G/2G, particularmente en los casos de la caña de azúcar y el maíz. (Louw et al., 2023; Pinheiro et al., 2025). Además del origen de la biomasa, otra distinción útil para analizar las biorrefinerías 2G tiene que ver con su organización territorial y logística, especialmente en términos de centralización y descentralización (C. Santos et al., 2018).

Aunque los artículos revisados no siempre emplean esta clasificación de manera directa, varios de ellos sí ofrecen elementos suficientes para reconocer ambas formas de configuración (Stoklosa et al., 2017). En general, las biorrefinerías centralizadas se asocian con instalaciones de mayor escala, donde las etapas de acondicionamiento, conversión y recuperación de productos se integran en una misma planta (Mokomele et al., 2018). Por contraste, las configuraciones descentralizadas adquieren mayor relevancia cuando la biomasa está dispersa en el territorio, presenta alta estacionalidad, ocupa grandes volúmenes o implica costos de transporte elevados (Pandey et al., 2021). En estos casos, acercar parte del procesamiento al lugar donde se genera el residuo puede mejorar el desempeño técnico, económico y ambiental del sistema. Esta perspectiva se refleja en propuestas de biorrefinerías satélite, planteadas precisamente para disminuir distancias de transporte y fortalecer la eficiencia global de la cadena (Msiska et al., 2024). También se reconoce en estudios donde la viabilidad del sistema depende en gran medida de la recolección, el almacenamiento y la movilización de residuos agrícolas (Petig et al., 2019)

En ese marco, resulta más adecuado plantear que las biorrefinerías 2G no responden a un único modelo territorial, sino que pueden desarrollarse bajo esquemas centralizados, descentralizados o incluso intermedios (Stoklosa et al., 2017), estas a su vez convierten la biomasa lignocelulósica residual en un portafolio de productos, mediante una cadena producción que integran operaciones físicas, químicas-catalíticas, biológicas y termoquímicas.

3.3.1 Cadena de Producción

A partir de los artículos que integran un análisis tecnoeconómico (TEA) y/o ambiental se puede llegar a evidenciar los puntos calientes o *hotspots*, que son puntos en las cadena de producción donde aparecen la mayoría de problemas económico o ambientales, es decir estos análisis sirven para la identificación y mejora de los procesos en una biorrefinería (Obydenkova,

Kouris, et al., 2022). En ese sentido, el proceso se dividió en cinco partes para su análisis: el suministro de biomasa, el pretratamiento, la conversión, venta de los productos y el tratamiento de aguas.

3.3.1.1 Suministro de biomasa.

La primera etapa corresponde principalmente a la recolección y transporte. En esta primera etapa se analizó la biomasa mayormente agrícola porque esta se encuentra en la zona de los cultivos, (Becerra-Pérez et al., 2022) muestra que la fracción accesible de residuos depende de variables como las condiciones del terreno, las vías, el acceso a los campos, la forma física del residuo y el clima. Además, no todo el residuo debe retirarse del sistema, ya que su extracción tiene implicaciones agronómicas asociadas a reposición de nutrientes y sostenibilidad del suelo. Por lo tanto, en un análisis económico y ambiental se debe tener en cuenta toda la cadena logística hasta la planta, esta fase es decisiva porque dependiendo de la disponibilidad de la biomasa el precio mínimo de venta de la materia prima puede variar, ocasionando sobrecoste, reduciendo el margen de ganancia (Athaley et al., 2019; N. Clauser et al., 2023; Correia et al., 2024; Dutta et al., 2023; Liao et al., 2022; Tan et al., 2017). Una de las soluciones, propuesta por (Msiska et al., 2024) es el implemento de biorrefinerías “satélites”, allí la biomasa se transforma hasta productos intermedios y luego es llevada a una planta centralizada, reduciendo en gran parte los costos.

3.3.1.2 Pretratamiento

La segunda etapa consta del acondicionamiento de la biomasa y el pretratamiento, porque allí se determina buena parte del costo y la eficiencia del resto del proceso. Aunque varios artículos no separan el acondicionamiento como una unidad independiente, sino que lo agrupan dentro de la cadena logística y el pretratamiento o en la mayoría de casos son variables fijas que se asumen, pero esta parte del proceso es esencial, porque como se mencionó anteriormente toda la biomasa

tiene diferente composición, por lo tanto, es necesario estandarizar ciertas variables como la humedad (Mokomele et al., 2018) el tamaño de partículas (Baral & Shah, 2017; Cardona-Alzate et al., 2025; Liu et al., 2023; Rodríguez-Valderrama, Escamilla-Alvarado, Magnin, et al., 2020; Vollmer et al., 2022), cenizas (Tan et al., 2017) (Dutta et al., 2023) o la relación líquido/sólido (N. Clauser et al., 2023) antes de proceder al pretratamiento. (C. Santos et al., 2018) evaluó ocho tecnologías de pretratamiento para obtener combustible de avión y concluyeron que la elección de esta etapa cambia de forma sustancial el precio mínimo de venta. A su vez (Baral & Shah, 2017) identificó el pretratamiento como el principal *hotspot* de la cadena de valor del etanol, evidenciando que optimizar esta etapa es clave no solo para liberar carbohidratos, sino también para reducir requerimientos de agua, energía e infraestructura y, con ello, mejorar la viabilidad económica global de la biorrefinería (Pinheiro et al., 2025).

3.3.1.3 Conversión

Está tercera etapa constituye el núcleo funcional de la biorrefinería, porque es allí donde las fracciones ya desestructuradas o solubilizadas de la biomasa se transforman efectivamente en productos de interés, como etanol, butanol, ácidos orgánicos, biogás, combustibles avanzados o compuestos de mayor valor agregado. Los artículos revisados muestran que la cadena no se vuelve rentable solo por integrar más procesos, sino por lograr que esa conversión ocurra con rendimientos suficientemente altos. (C. Santos et al., 2018) también indica que en una biorrefinería 1G/2G la elección de la ruta de conversión posterior al pretratamiento modifica de manera importante el desempeño tecnoeconómico del sistema. De forma similar, (Beisl et al., 2019) plantean que, una vez separadas celulosa, hemicelulosa y lignina, el verdadero aprovechamiento de la biomasa depende de la capacidad de convertir esas corrientes en productos diferenciados, de modo que la rentabilidad no está dada solo por fraccionar, sino por convertir eficientemente cada

fracción. En conclusión, la conversión constituye una etapa determinante, ya que define no solo el grado de despolimerización de la lignina, sino también la distribución y el valor de los productos finales obtenidos, por ejemplo, Vural Gürsel et al. demostraron que según la ruta de conversión elegida, los productos pueden ser de mayor valor comercial (Vural Gursel et al., 2019). De manera complementaria, Abdelaziz et al. evidenciaron que la ruta de despolimerización oxidativa de lignina Kraft puede orientarse hasta la obtención de compuestos aromáticos finales como vainillina, ácido vainílico, guayacol y acetovainillona (Abdelaziz et al., 2020), confirmando que la ruta de conversión es clave para la valorización posterior.

3.3.1.4 *Venta de los productos*

Está cuarta etapa incluye el acondicionamiento y venta de productos y coproductos es decisiva dentro de la cadena de producción de una biorrefinería porque en ella se define si las corrientes obtenidas tras la conversión alcanzan la pureza, estabilidad y especificaciones requeridas para ingresar al mercado y, sobre todo, si pueden hacerlo a un precio competitivo a del producto en referencia obtenido por la vía convencional. (Stoklosa et al., 2017) compara 2 escenarios uno centralizado y otro descentralizado, produciendo etanol celulósico y se logra evidenciar la importancia del precio mínimo de venta, por ejemplo, (Pinheiro et al., 2025) reporta que uno de los escenarios solo alcanzaría rentabilidad si el precio del etanol comercial aumentara 43.5 %, en el mismo sentido, (Agraso-Otero et al., 2025) concluye que ninguna alternativa fue económicamente viable en las escalas estudiadas y que la rentabilidad exigiría elevar el precio mínimo de venta, mejorar rendimientos o reducir costos operativos, varios trabajos de la matriz muestran que la venta del producto principal rara vez es suficiente por sí sola, de modo que la valorización de coproductos se convierte en una estrategia clave para distribuir costos y capturar mayor valor (Beisl et al., 2019; N. M. Clauser et al., 2021). Sin embargo, esta valorización también

implica mayores exigencias de separación, purificación y acondicionamiento, Por ejemplo, (Vural Gursel et al., 2019) compararon tres rutas de valorización de lignina y encontraron que el proceso de hidredesoxigenación directa (HDO) tuvo los costos operativos más altos, debido principalmente al consumo de hidrógeno, pero, al mismo tiempo, presentó el mayor retorno sobre la inversión y el menor periodo de recuperación gracias a sus mayores rendimientos de compuestos valiosos. En conjunto, la evidencia sugiere que esta cuarta fase es importante en la cadena de producción, aquí se define si el valor potencial generado en las fases previas se convierte efectivamente en rentabilidad para la biorrefinería.

3.3.1.5 Tratamiento de aguas

En la mayoría de los artículos revisados, el tratamiento o la gestión de aguas residuales generadas dentro del proceso no aparece tan desarrollado como otras etapas de la cadena de producción, pero su importancia radica en que estas corrientes concentran una fracción significativa de la carga orgánica del proceso, así como azúcares no convertidos, compuestos solubles provenientes de la biomasa y, en algunos casos, fracciones lignínicas disueltas, por lo que su manejo requieren rutas de tratamiento eficientes para evitar efectos ambientales adversos y, simultáneamente, favorecer la recuperación energética del sistema, por ejemplo el estudio de (W. G. Sganzerla et al., 2023) resulta interesante porque aborda de forma directa el tratamiento de aguas residuales cerveceras mediante co-digestión anaerobia con bagazo cervicero y lodo procedente de la propia planta de tratamiento y mostrando que el sistema puede estabilizar la carga orgánica del efluente mientras incrementa la producción de metano y bioenergía. Esto se complementa con el enfoque presentado por (Wang et al., 2023) en la sección de tratamientos de aguas donde tratan las corrientes líquidas de alta carga orgánica, incorporan co-digestión de residuos húmedos adicionales y generan biogás para distintos usos posteriores, como energía o

bioproductos de mayor valor. En conjunto, los estudios sugieren que el tratamiento de aguas residuales del proceso debe concebirse, dentro del esquema de biorrefinería, como una etapa de cierre de ciclo que reduce la carga contaminante de las corrientes líquidas contribuyendo simultáneamente a la sostenibilidad ambiental, energética y económica del sistema.

3.4 Pretratamientos

Dentro de las biorrefinerías lignocelulósicas, el pretratamiento representa la primera etapa tecnológica para la valorización de la biomasa, y por ello constituye una de las fases más determinantes de toda la cadena de conversión (Baral & Shah, 2017). Al ser el punto de partida del aprovechamiento de la materia prima, esta etapa define en gran medida la posibilidad de modificar la recalcitrancia estructural del material, aumentar la accesibilidad de la celulosa y facilitar la posterior recuperación o transformación de hemicelulosa, lignina y otros compuestos de interés (Poveda-Giraldo & Cardona, 2023). En ese sentido, el pretratamiento no debe entenderse únicamente como una operación preliminar, sino como una decisión estratégica de diseño que condiciona tanto la eficiencia técnica como la viabilidad económica de la biorrefinería (Stoklosa et al., 2017). Además, su adecuada selección influye directamente sobre la integración del proceso, los rendimientos posteriores y el verdadero potencial de valorización de la biomasa lignocelulósica residual (Patel et al., 2025).

En la selección revisada, las rutas que aparecen con mayor claridad son la explosión de vapor, la expansión de fibra con amoníaco (AFEX, por sus siglas en inglés *Ammonia Fiber Expansion*), los pretratamientos alcalinos, los tratamientos hidrotérmicos y, en menor medida, enfoques biológicos (Baral & Shah, 2017),(Mokomele et al., 2018), (Stoklosa et al., 2017). Esta diversidad tecnológica refleja que la valorización de la biomasa no sigue una única trayectoria, sino que depende de las características del sustrato y del tipo de productos que se pretenden obtener

(Stoklosa et al., 2017). Por ello, el análisis del pretratamiento debe abordarse no solo desde su capacidad para romper la estructura lignocelulósica, sino también desde su efecto sobre las etapas posteriores de la biorrefinería (Poveda-Giraldo & Cardona, 2023).

La explosión de vapor destaca por su madurez relativa dentro de esquemas 2G, ya que ha sido comparada directamente con ácido diluido, AFEX y pretratamiento biológico en rastrojo de maíz, mostrando diferencias importantes en costos, severidad operativa y precio mínimo del producto (Baral & Shah, 2017). Su interés radica en que permite desestructurar la biomasa y mejorar la conversión subsiguiente sin requerir, en todos los casos, un uso intensivo de reactivos químicos (Baral & Shah, 2017). En residuos de caña de azúcar, la comparación entre *steam explosion* y AFEX confirma que la elección del pretratamiento no solo afecta la liberación de fracciones aprovechables, sino también el grado de integración posible entre la producción de biocombustibles y la obtención de coproductos de mayor valor (Mokomele et al., 2018). En este tipo de configuraciones, el pretratamiento deja de ser una simple preparación de la biomasa y pasa a actuar como una etapa que orienta la valorización global del sistema (Mokomele et al., 2018).

Cuando el análisis se desplaza hacia rutas alcalinas, el pretratamiento adquiere todavía mayor relevancia estratégica, ya que sus efectos trascienden la mejora de la hidrólisis y alcanzan aspectos como la recuperación química, el uso de agua y la configuración territorial de la planta (Stoklosa et al., 2017). Esto resulta particularmente importante en biorrefinerías basadas en biomasa residual dispersa, donde la viabilidad de la valorización depende tanto del acondicionamiento de la materia prima como de la logística de suministro. Incluso se han propuesto enfoques en los que parte del acondicionamiento ocurre antes del reactor principal, como la desacetilación asistida con álcali durante el almacenamiento, lo que amplía la noción convencional de pretratamiento y la conecta directamente con la cadena de suministro (Wendt

et al., 2021). Desde esta perspectiva, el pretratamiento no comienza necesariamente dentro de la planta, sino desde las decisiones iniciales de manejo de la biomasa.

Los tratamientos hidrotérmicos también ocupan un lugar relevante dentro de la valorización lignocelulósica, especialmente porque permiten modificar la biomasa sin incorporar grandes cantidades de reactivos minerales (Díaz et al., 2021). Entre ellos, la auto hidrólisis ha mostrado resultados prometedores en pseudotallo de banano, donde se obtuvo una corriente líquida rica en oligosacáridos y, al mismo tiempo, se mejoró la digestibilidad enzimática del sólido remanente. Esto demuestra que el pretratamiento no solo puede facilitar etapas posteriores, sino también generar desde el inicio corrientes intermedias con potencial de aprovechamiento. En una línea semejante, la hidrólisis con agua subcrítica ha sido evaluada para bagazo cervecero agotado como una vía para producir azúcares fermentables a partir de un residuo agroindustrial de alta disponibilidad (W. Sganzerla et al., 2021). En ambos casos, el pretratamiento funciona claramente como la primera etapa de valorización, ya que transforma una biomasa residual de baja utilidad directa en corrientes con valor potencial para procesos posteriores (W. Sganzerla et al., 2021).

El pretratamiento biológico, particularmente mediante hongos, se presenta como una alternativa atractiva por operar bajo condiciones suaves y con menor consumo de reactivos (Vasco-Correa & Shah, 2019). Su interés radica en que puede contribuir a una valorización más compatible con criterios de sostenibilidad, al reducir la severidad química y energética del proceso (Vasco-Correa & Shah, 2019). Sin embargo, su principal limitación sigue siendo la baja productividad asociada a tiempos de residencia prolongados, lo que restringe su competitividad frente a tecnologías más consolidadas como *steam explosion*, AFEX o los tratamientos alcalinos (Vasco-Correa & Shah, 2019). Por tanto, aunque conceptualmente ofrece ventajas, su implementación

industrial todavía enfrenta barreras relevantes cuando se compara con rutas más maduras de pretratamiento (Vasco-Correa & Shah, 2019).

Además, el pretratamiento no debe evaluarse únicamente por el rendimiento alcanzado en la fracción principal, sino también por su capacidad para generar o preservar corrientes laterales susceptibles de aprovechamiento. Esto se ha evidenciado en estudios sobre paja de trigo y otros residuos lignocelulósicos, en los que los subproductos obtenidos durante el fraccionamiento inicial pueden destinarse a la producción de sustratos para microorganismos o integrarse en otras rutas de valorización (Beisl et al., 2019). En este sentido, el pretratamiento trasciende su función de acondicionamiento de la biomasa y adquiere un papel estratégico dentro de la biorrefinería, ya que no solo facilita las conversiones posteriores, sino que también amplía las posibilidades de aprovechamiento integral del recurso.

3.5 Rutas de conversión

Las rutas de conversión corresponden al conjunto de procesos mediante los cuales la biomasa es transformada en biocombustibles, bioenergía o bioproductos de valor agregado, a través de mecanismos bioquímicos, químicos, termoquímicos, físicos o combinados. El esquema (Figura 6) presenta la clasificación de las principales rutas identificadas en la revisión. Las definiciones y descripciones detalladas de cada una de las rutas se encuentran consignadas en el Apéndice C.

Figura 6

Rutas de Conversión



3.6 Madurez tecnológica en la matriz

Al organizar metodológicamente los 130 artículos revisados, se observa que los estudios con una simulación/modelado predominan con 57 artículos seguido de evaluación técnica con 45, trabajos experimentales o de laboratorio con 20, y 8 estudios mixtos, en los cuales su estructura incluye parte experimental y parte técnica. Esta distribución sugiere que el campo ha avanzado de manera importante en la formulación de escenarios, el diseño conceptual de procesos, la comparación de configuraciones y la estimación de indicadores de viabilidad; sin embargo, la proporción relativamente menor de estudios experimentales y mixtos indica que una parte significativa de las propuestas aún se encuentra más consolidada en el plano analítico que en el de la validación tecnológica integral. En otras palabras, la literatura revisada evidencia un desarrollo robusto en términos de conocimiento técnico y evaluación de alternativas, pero no necesariamente una madurez equivalente en demostración operativa o implementación preindustrial.

Al observar más a fondo la matriz se evidencia que una fracción considerable de los artículos incorpora criterios de viabilidad económica y/o ambiental, más exactamente 99 artículos reportan algún tipo de análisis económico, y dentro de ellos predominan las evaluaciones tecnoeconómicas con 62 artículos y 34 artículos que combinan análisis tecnoeconómico y ambiental. Este patrón resulta relevante porque muestra que el debate sobre biorrefinerías ha superado parcialmente la fase de prueba estrictamente conceptual y ha comenzado a integrar variables asociadas al escalamiento, el costo del proceso y el desempeño ambiental. No obstante, el hecho de que este tipo de análisis aparezca con tanta frecuencia no implica, por sí mismo, que las tecnologías se encuentren en una etapa avanzada de implementación. Por el contrario, en muchos casos esta madurez es todavía analítica, ya que deriva de modelos, balances de masa y energía, simulaciones de proceso o escenarios de diseño, más que de validaciones en condiciones cercanas a la operación industrial. Estudios como los de (Abdelaziz et al., 2020; Agraso-Otero et al., 2025; Ocampo Batlle et al., 2021; C. Santos et al., 2018) ilustran precisamente esta tendencia: se trata de trabajos metodológicamente sólidos, con una visión integral del sistema y con indicadores útiles para la toma de decisiones, pero que aún dependen de supuestos técnicos y económicos para proyectar su factibilidad.

Las rutas orientadas a bioenergía parecen ubicarse en un nivel de desarrollo más avanzado que aquellas dirigidas a bioproductos más especializados o de mayor complejidad de integración. Esto no significa que se encuentren plenamente maduras en términos comerciales, sino que presentan un mayor grado de estructuración metodológica y una base más amplia de análisis comparativos. Por ejemplo, las propuestas asociadas a digestión anaerobia, integración energética, producción de combustibles líquidos o valorización de residuos agroindustriales en sistemas multiproducto cuentan con numerosos estudios de simulación, evaluación tecnoeconómica y

análisis ambiental (Hafyan et al., 2020; D. S. Santos et al., 2025; Wang et al., 2023). De forma complementaria, los artículos de enfoque mixto aportan una evidencia particularmente valiosa para interpretar la madurez tecnológica, ya que combinan validación experimental con simulación o análisis de sostenibilidad. Este tipo de estudios, aunque menos numerosos en la matriz, permite una aproximación más robusta al potencial real de las biorrefinerías, al conectar resultados obtenidos en laboratorio con estimaciones de viabilidad técnica, económica o ambiental. Trabajos como (Arias et al., 2023; Baral & Shah, 2017; Dávila et al., 2017) resultan ilustrativos en este sentido, pues muestran una transición metodológica entre la prueba experimental y la modelación del sistema, acercándose más a una lógica de escalamiento. Sin embargo, precisamente por su número limitado, estos estudios también ponen en evidencia que el tránsito entre experimentación y validación integral sigue siendo una de las brechas del campo.

En conjunto, la revisión sugiere que la madurez tecnológica de las rutas de biorrefinería identificadas no puede entenderse de forma homogénea ni lineal. Más bien, se trata de un panorama en el que conviven tecnologías con un desarrollo metodológico relativamente avanzado gracias a la abundancia de estudios de este sector, respecto a otras que permanecen ancladas a escalas experimentales o a pruebas de concepto. Por ello, la principal conclusión de este apartado es que el estado actual del campo refleja una madurez tecnológica intermedia y desigual: suficiente para identificar rutas prometedoras y estimar condiciones de viabilidad, pero todavía insuficiente, en muchos casos, para asumir que dichas configuraciones se encuentran listas para una implementación amplia sin etapas adicionales de validación, integración y escalamiento.

4. Desafíos para la consolidación y escalamiento de las biorrefinerías.

A partir de la revisión realizada a la cadena de producción de una biorrefinería se pueden evidenciar los diferentes desafíos o puntos críticos a tener en cuenta. En este sentido, uno de los

principales hallazgos de la matriz es que, aunque existen numerosos trabajos que reportan resultados favorables en rendimiento, aprovechamiento energético o potencial de valorización, muy pocos abordan la cadena de producción de forma verdaderamente integral. Predominan los estudios centrados en una etapa específica, mientras que son menos frecuentes los artículos que tienen en cuenta toda la cadena de producción. Esto implica que muchos resultados positivos deben interpretarse con cautela, pues la factibilidad observada en una unidad del proceso no garantiza, por sí sola, la viabilidad del sistema global.

En consecuencia, uno de los desafíos más importantes para la consolidación y escalamiento de las biorrefinerías no es solo tecnológico, sino también metodológico. La revisión pone en evidencia la necesidad de avanzar hacia evaluaciones más integrales que consideren de manera conjunta los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales de toda la cadena de producción. Sin este tipo de aproximaciones, persiste el riesgo de sobreestimar el potencial de ciertas rutas o de interpretar como maduras configuraciones que, en realidad, solo han demostrado solidez en segmentos parciales del proceso. En síntesis, la revisión sugiere que las biorrefinerías ya cuentan con un acervo tecnológico importante, pero su consolidación efectiva dependerá de la capacidad de integrar y evaluar rigurosamente la cadena completa, más allá de los resultados favorables obtenidos en etapas individuales.

5. Implicaciones y perspectivas para el contexto colombiano

Los hallazgos de la revisión adquieren una relevancia particular al trasladarse al contexto colombiano, ya que la matriz incluye cerca de veinte artículos desarrollados específicamente en el país o formulados para condiciones colombianas. Esta presencia no es menor, pues indica que Colombia no solo aparece como un proveedor potencial de biomasa residual, sino también como un escenario de análisis técnico, económico y ambiental para el diseño de biorrefinerías. Sin

embargo, la principal implicación que se desprende de este conjunto de estudios es que el país se encuentra, principalmente, en una fase de construcción conceptual y evaluación estratégica, más que en una etapa de despliegue tecnológico consolidado. En otras palabras, la literatura revisada sugiere que Colombia ya cuenta con una base académica y metodológica relevante para pensar en biorrefinerías, pero todavía persiste una distancia importante entre el potencial identificado y su materialización.

Los estudios colombianos revisados muestran que existe interés en diferentes configuraciones de biorrefinería, desde escenarios técnico-económicos a pequeña escala hasta evaluaciones de sostenibilidad, integración de procesos, síntesis de rutas y selección de alternativas de transformación. Trabajos como los de (Bedoya Betancur et al., 2021; Cardona et al., 2023; Gómez et al., 2022; Ortiz-Sánchez & Cardona, 2022; Piedrahita-Rodríguez et al., 2024) evidencian que el país ha avanzado en la formulación de análisis capaces de conectar los residuos agroindustriales o agrícolas con la valorización multiproducto teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad. Esto es significativo porque demuestra que el debate nacional no se limita a identificar materias primas disponibles, sino que ha comenzado a incorporar dimensiones más complejas, como integración energética, selección de portafolios de productos, escalamiento y desempeño ambiental. Desde esta perspectiva, un punto a favor para Colombia es que ya existe una masa considerable de conocimiento que puede servir de base para decisiones futuras de investigación aplicada, desarrollo tecnológico y formulación de proyectos piloto.

No obstante, la revisión también permite advertir una limitación importante: la mayoría de los estudios colombianos sigue concentrándose en simulaciones, diseños conceptuales, evaluaciones de sostenibilidad o análisis metodológicos. Incluso en los artículos más robustos desde el punto de vista analítico, la viabilidad suele proyectarse a partir de escenarios modelados,

indicadores técnicos o supuestos de mercado, lo que confirma que el reto nacional no radica exclusivamente en demostrar que las biorrefinerías son posibles, sino en avanzar hacia condiciones reales. Esta observación tiene una implicación directa para el contexto colombiano: el siguiente paso no debería ser únicamente seguir ampliando el inventario de residuos o formulando nuevas alternativas conceptuales, sino fortalecer la transición hacia estudios de validación más integrales, en los que la simulación, la experimentación, la logística y la evaluación económica y ambiental de toda la cadena converjan en una misma propuesta.

Otra implicación importante es que, para Colombia, la consolidación de biorrefinerías probablemente dependerá de su capacidad para articularse con cadenas productivas ya existentes. La evidencia revisada sugiere que el país podría beneficiarse más de configuraciones conectadas a sistemas agroindustriales que de modelos excesivamente complejos y descontextualizados de las condiciones locales. Esto resulta particularmente relevante en un territorio caracterizado por diversidad productiva, contrastes regionales, limitaciones logísticas y desigual desarrollo industrial. En este marco, las biorrefinerías no deberían concebirse únicamente como plantas de alta sofisticación tecnológica, sino también como plataformas adaptables a escalas intermedias o regionales, capaces de integrarse con infraestructuras ya presentes y con dinámicas económicas del entorno, como lo indican (Cardona et al., 2023; Cardona-Alzate et al., 2025; Quintero-Naucil et al., 2024).

En síntesis, la revisión sugiere que Colombia dispone de condiciones favorables para el desarrollo de biorrefinerías, pero que su principal desafío no es demostrar la existencia de recursos o de rutas tecnológicamente viables, sino cerrar la brecha entre estudio técnico y la aplicación. El aporte más importante de esta revisión para el país es: las biorrefinerías deberían entenderse como una oportunidad real para diversificar el aprovechamiento de residuos y fortalecer la sostenibilidad

de sectores productivos, pero su avance dependerá de priorizar configuraciones adaptadas al territorio, fortalecer evaluaciones integrales de toda la cadena, y avanzar desde el diseño conceptual hacia etapas de validación y escalamiento más cercanas a la realidad industrial colombiana.

6. Conclusiones

- La aplicación de la metodología PRISMA permitió construir una base documental para abordar la factibilidad de una biorrefinería basada en biomasa lignocelulósica residual en Colombia. En este sentido, la revisión sistemática no solo facilitó la selección de estudios directamente relacionados con el problema de investigación, sino que también proporcionó una estructura metodológica sólida para identificar, comparar y sintetizar evidencia técnica, económica y ambiental sobre las tecnologías de valorización reportadas en la literatura reciente.
- El análisis bibliométrico evidenció que la investigación en biorrefinerías ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años y que se encuentra fuertemente asociada a enfoques de sostenibilidad, evaluación tecnoeconómica y valorización de biomasa residual. Asimismo, se identificó un predominio de estudios de simulación, modelado y evaluación técnica sobre trabajos de validación experimental integrada, lo que indica que el campo presenta un desarrollo metodológico importante, pero una madurez tecnológica todavía intermedia y desigual. En consecuencia, la literatura actual permite reconocer rutas promisorias y tendencias consolidadas de investigación, aunque no siempre demuestra un nivel equivalente de implementación preindustrial o industrial.
- La revisión permitió evidenciar que los desafíos actuales para la consolidación de biorrefinerías, particularmente en el contexto colombiano, no se limitan a la disponibilidad de biomasa, sino que abarcan la articulación completa de la cadena de producción. Entre los

principales retos se encuentran la logística de suministro, la heterogeneidad de la biomasa, la exigencia técnica y económica del pretratamiento, la eficiencia de conversión, la valorización de coproductos, el tratamiento de corrientes residuales y la necesidad de integrar de manera conjunta criterios técnicos, económicos, ambientales y territoriales. Además, se observó que muy pocos estudios evalúan de forma integral toda la cadena, lo que limita la extrapolación de resultados parciales hacia escenarios reales de implementación.

- Con base en la evidencia revisada, se concluye que la implementación de una biorrefinería basada en biomasa residual en Colombia es factible como horizonte técnico y estratégico, pero dicha factibilidad es condicionada y no automática. Su materialización dependerá de avanzar desde estudios conceptuales y de factibilidad hacia esquemas más integrados de validación, escalamiento y articulación institucional, capaces de responder a las condiciones logísticas, productivas e industriales del país. Por tanto, más que demostrar únicamente el potencial de los residuos lignocelulósicos, el reto para Colombia consiste en transformar ese potencial en configuraciones de biorrefinería viables, adaptadas al territorio y sustentadas en evaluaciones rigurosas de toda la cadena de valor.

Referencias Bibliográficas

- Abdelaziz, O., Al-Rabiah, A., El-Halwagi, M., & Hulteberg, C. (2020). Conceptual Design of a Kraft Lignin Biorefinery for the Production of Valuable Chemicals via Oxidative Depolymerization. *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, 8(23), 8823-8829. (WOS:000541876900036). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02945>
- Abdullah, S. S. S., Shirai, Y., Ali, A. A. M., Mustapha, M., & Hassan, M. A. (2016). Case study: Preliminary assessment of integrated palm biomass biorefinery for bioethanol production utilizing non-food sugars from oil palm frond petiole. *Energy Conversion and Management*, 108, 233-242. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.016>
- Adamovic, T., Tarasov, D., Demirkaya, E., Balakshin, M., & Cocero, M. (2021). A feasibility study on green biorefinery of high lignin content agro-food industry waste through supercritical water treatment. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 323. (WOS:000705658100001). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129110>
- Agraso-Otero, A., Rebolledo-Leiva, R., Entrena-Barbero, E., & González-García, S. (2025). Integrated process design, techno-economic and environmental analysis of chokeberry pomace biorefineries: Phenolic compounds extraction with ethanol or energy production? *Environmental Technology and Innovation*, 38. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104165>
- Almeida, P., Gando-Ferreira, L., & Quina, M. (2023). Biorefinery perspective for industrial potato peel management: Technology readiness level and economic assessment. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL CHEMICAL ENGINEERING*, 11(3). (WOS:001041646200001). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110049>

- Arias, A., Costa, C., Feijoo, G., Moreira, M., & Domingues, L. (2023). Process modeling, environmental and economic sustainability of the valorization of whey and eucalyptus residues for resveratrol biosynthesis. *WASTE MANAGEMENT*, *172*, 226-234. (WOS:001107310600001). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.030>
- Arts, W., Van Aelst, K., Cooreman, E., van Aelst, J., van den Bosch, S., & Sels, B. (2023). Stepping away from purified solvents in reductive catalytic fractionation: A step forward towards a disruptive wood biorefinery process. *ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE*, *16*(6), 2518-2539. (WOS:000980248500001). <https://doi.org/10.1039/d3ee00965c>
- Athaley, A., Annam, P., Saha, B., & Ierapetritou, M. (2019). Techno-economic and life cycle analysis of different types of hydrolysis process for the production of p-Xylene. *COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING*, *121*, 685-695. (WOS:000460730900053). <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.11.018>
- Aura Rodriguez, John Angel, Edwin Rivero, Paola Acevedo, Angelica Santis, Ivan O. Cabeza Rojas, Martha Acosta, & Mario Hernandez. (2017). Evaluation of the biochemical methane potential of pig manure, organic fraction of municipal solid waste and cocoa industry residues in colombia. *Chemical Engineering Transactions*, *57*, 55-60. <https://doi.org/10.3303/CET1757010>
- Baral, N., & Shah, A. (2017). Comparative techno-economic analysis of steam explosion, dilute sulfuric acid, ammonia fiber explosion and biological pretreatments of corn stover. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, *232*, 331-343. (WOS:000400867100041). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.068>

- Bartling, A., Stone, M., Hanes, R., Bhatt, A., Zhang, Y., Bidy, M., Davis, R., Kruger, J., Thornburg, N., Luterbacher, J., Rinaldi, R., Samec, J., Sels, B., Roman-Leshkov, Y., & Beckham, G. (2021). Techno-economic analysis and life cycle assessment of a biorefinery utilizing reductive catalytic fractionation. *ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE*, *14*(8), 4147-4168. (WOS:000674764300001). <https://doi.org/10.1039/d1ee01642c>
- Batten, R., Karanjikar, M., & Spatari, S. (2024). A sustainable aviation fuel pathway from biomass: Life cycle environmental and cost evaluation for dimethylcyclooctane jet fuel. *SUSTAINABLE ENERGY & FUELS*, *8*(9). (WOS:001199674200001). <https://doi.org/10.1039/d3se01470c>
- Becerra-Pérez, L. A., Rincon, L. E., & Posada, J. A. (2022). Logistics and Costs of Agricultural Residues for Cellulosic Ethanol Production. *Energies*, *15*(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/en15124480>
- Bedoya Betancur, S., Amar-Gil, S., Barrera, Z. R., Arriola, V. E., & Ardila-Arias, A. A. N. (2021). Technical and Economic Scenario for the Integral Small-Scale Valorization of Orange Waste in Colombia. *Ingenieria (Colombia)*, *26*(3), 367-380. Scopus. <https://doi.org/10.14483/23448393.17783>
- Beisl, S., Quehenberger, J., Kamravamanesh, D., Spadiut, O., & Friedl, A. (2019). Exploitation of Wheat Straw Biorefinery Side Streams as Sustainable Substrates for Microorganisms: A Feasibility Study. *PROCESSES*, *7*(12). (WOS:000506635300093). <https://doi.org/10.3390/pr7120956>
- Bhagwat, S., Li, Y., Cortés-Peña, Y., Brace, E., Martin, T., Zhao, H., & Guest, J. (2021). Sustainable Production of Acrylic Acid via 3-Hydroxypropionic Acid from Lignocellulosic Biomass. *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, *9*(49),

16659-16669. (WOS:000753961000013).

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05441>

Blanco-Cejas, J., Agirre, I., Gandarias, I., Moreno, J., & Iglesias, J. (2025). Towards greener furfural: Evaluating the technical, economic and environmental feasibility of heterogeneous catalysis in biomass conversion. *RSC SUSTAINABILITY*, 3(7), 2899-2914. (WOS:001501682200001). <https://doi.org/10.1039/d5su00106d>

Boom-Cárcamo, E., Peñabaena-Niebles, R., & Alean, J. (2025). Scenario analysis of the use of oil palm residual biomass for bioenergy generation: A comparison with fossil fuels. *Energy*, 335, 137933. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137933>

Bressanin, J., Klein, B., Chagas, M., Watanabe, M., Sampaio, I., Bonomi, A., de Moraes, E., & Cavalett, O. (2020). Techno-Economic and Environmental Assessment of Biomass Gasification and Fischer-Tropsch Synthesis Integrated to Sugarcane Biorefineries. *ENERGIES*, 13(17). (WOS:000571236200001). <https://doi.org/10.3390/en13174576>

Brondi, M., Elias, A., Furlan, F., Giordano, R., & Farinas, C. (2020). Performance targets defined by retro-techno-economic analysis for the use of soybean protein as saccharification additive in an integrated biorefinery. *SCIENTIFIC REPORTS*, 10(1). (WOS:000559954900044). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64316-6>

Burbano-Cuasapud, J. M., Solarte-Toro, J. C., Restrepo-Serna, D. L., & Cardona, C. A. (2023). Process Sustainability Analysis of Biorefineries to Produce Biofertilizers and Bioenergy from Biodegradable Residues. *Fermentation*, 9(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/fermentation9090788>

- Cañon, C., Sanchez, N., & Cobo, M. (2022). Sustainable production of ethyl levulinate by levulinic acid esterification obtained from Colombian rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134276>
- Cardona, C. A., Ortiz-Sánchez, M., Salgado, N., Solarte-Toro, J. C., Orrego, C. E., Alexander Pérez, A., Acosta, C. D., Ledezma, E., Salas, H., & Gonzaga, J. (2023). Sustainability Assessment of Food Waste Biorefineries as the Base of the Entrepreneurship in Rural Zones of Colombia. *Fermentation*, 9(7). Scopus. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070609>
- Cardona-Alzate, C. A., Solarte-Toro, J. C., Ortiz-Sánchez, M., Inocencio-García, P. J., Salcedo-Mendoza, J., Hernandez-Ruydiaz, J., & Otero Meza, D. D. (2025). Bioenergy and Biorefinery Potential of Residues: A Representative Case of the Sucre Region in Colombia. *Waste and Biomass Valorization*, 16(1), 85-103. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02473-9>
- Carmo-Calado, L., Hermoso-Orzáez, M., La Cal-Herrera, J., Brito, P., & Terrados-Cepeda, J. (2023). Techno-Economic Evaluation of Downdraft Fixed Bed Gasification of Almond Shell and Husk as a Process Step in Energy Production for Decentralized Solutions Applied in Biorefinery Systems. *AGRONOMY-BASEL*, 13(9). (WOS:001080704400001). <https://doi.org/10.3390/agronomy13092278>
- Carmo-Calado, L., Mota-Panizio, R., Assis, A., Nobre, C., Alves, O., Lourinho, G., & Brito, P. (2023). Pre-Feasibility Study of a Multi-Product Biorefinery for the Production of Essential Oils and Biomethane. *C-JOURNAL OF CARBON RESEARCH*, 9(1). (WOS:000957386800001). <https://doi.org/10.3390/c9010002>

- Carus, M., & Dammer, L. (2018). The Circular Bioeconomy—Concepts, Opportunities, and Limitations. *Industrial Biotechnology*, 14(2), 83-91. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.29121.mca>
- Castro, R. C. D. A., Cabrera Camacho, C. E., Roberto, I. C., & Mussatto, S. I. (2025). Techno-economic assessment of rice straw biorefineries to produce ethanol with co-production of xylitol and phenolic acids. *Biomass and Bioenergy*, 197. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107804>
- Clauser, N., Felissia, F., Area, M., & Vallejos, M. (2023). Process Design for Value-Added Products in a Biorefinery Platform from Agro and Forest Industrial Byproducts. *POLYMERS*, 15(2). (WOS:000927341900001). <https://doi.org/10.3390/polym15020274>
- Clauser, N. M., González, G., Mendieta, C. M., Kruyeniski, J., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2021). Biomass waste as sustainable raw material for energy and fuels. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1-21. Scopus. <https://doi.org/10.3390/su13020794>
- Correia, B., Matos, H., Lopes, T., Marques, S., & Gírio, F. (2024). Sustainability Assessment of 2G Bioethanol Production from Residual Lignocellulosic Biomass. *PROCESSES*, 12(5). (WOS:001231610300001). <https://doi.org/10.3390/pr12050987>
- Dávila, J. A., Rosenberg, M., & Cardona, C. A. (2017). A biorefinery for efficient processing and utilization of spent pulp of Colombian Andes Berry (*Rubus glaucus* Benth.): Experimental, techno-economic and environmental assessment. *Bioresource Technology*, 223, 227-236. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.050>
- Díaz, S., Ortega, Z., Benítez Vega, A. N., Costa, D., Carvalheiro, F., Fernandes, M. C., & Duarte, L. C. (2021). Assessment of the effect of autohydrolysis treatment in banana's pseudostem

- pulp. *Waste Management*, *119*, 306-314. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.034>
- Dudek, K., Mokarrari, K., Aghamohamadi-Bosjin, S., Valdez-Vazquez, I., & Sowlati, T. (2025). Techno-economic analysis and strategic optimization of biobutanol production from lignocellulosic biomass in Mexico. *BIOMASS CONVERSION AND BIOREFINERY*, *15*(1), 217-241. (WOS:001172332000002). <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05393-9>
- Dutta, A., Cai, H., Talmadge, M., Mukarakate, C., Iisa, K., Wang, H., Santosa, D., Ou, L., Hartley, D., Wilson, A., Schaidle, J., & Griffin, M. (2023). Model quantification of the effect of coproducts and refinery co-hydrotreating on the economics and greenhouse gas emissions of a conceptual biomass catalytic fast pyrolysis process. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, *451*. (WOS:000875155700004). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138485>
- Ebrahimpourboura, Z., Mosalpuri, M., Yang, C., Ponukumati, A., Stephenson, C., Foston, M., & Wright, M. (2024). Comparative techno-economic and life cycle assessment of electrocatalytic processes for lignin valorization. *GREEN CHEMISTRY*, *26*(22), 11303-11315. (WOS:001333157000001). <https://doi.org/10.1039/d4gc01963f>
- Escanciano, I., Blanco, A., Santos, V., & Ladero, M. (2025). Integral use of brewery wastes as carbon and nitrogen sources for the bioproduction of succinic acid. *BIOMASS CONVERSION AND BIOREFINERY*, *15*(5), 6889-6899. (WOS:001205250500001). <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05615-0>
- Gadkari, S., Narisetty, V., Maity, S., Manyar, H., Mohanty, K., Jeyakumar, R., Pant, K., & Kumar, V. (2023). Techno-Economic Analysis of 2,3-Butanediol Production from Sugarcane Bagasse. *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, *11*(22), 8337-8349. (WOS:001012167800001). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c01221>

- Ganguly, A., Brown, R., & Wright, M. (2022). Investigating the Impacts of Feedstock Variability on a Carbon-Negative Autothermal Pyrolysis System Using Machine Learning. *FRONTIERS IN CLIMATE*, 4. (WOS:001019297200001). <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.842650>
- García-Velásquez, C. A., Moncada, J., Aristizábal, V., & Cardona, C. A. (2017). Techno-economic and energetic assessment of hydrogen production through gasification in the Colombian context: Coffee Cut-Stems case. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(9), 5849-5864. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.073>
- Ghysels, S., Acosta, N., Estrada, A., Pala, M., de Vrieze, J., Ronsse, F., & Rabaey, K. (2020). Integrating anaerobic digestion and slow pyrolysis improves the product portfolio of a cocoa waste biorefinery. *Sustainable Energy and Fuels*, 4(7), 3712-3725. Scopus. <https://doi.org/10.1039/d0se00689k>
- Gómez, J. A., Matallana, L. G., & Sánchez, Ó. J. (2022). Towards a Biorefinery Processing Waste from Plantain Agro-Industry: Process Design and Techno-Economic Assessment of Single-Cell Protein, Natural Fibers, and Biomethane Production through Process Simulation. *Fermentation*, 8(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/fermentation8110582>
- Hafyan, R., Bhullar, L., Mahadzir, S., Bilad, M., Nordin, N., Wirzal, M., Putra, Z., Rangaiah, G., & Abdullah, B. (2020). Integrated Biorefinery of Empty Fruit Bunch from Palm Oil Industries to Produce Valuable Biochemicals. *PROCESSES*, 8(7). (WOS:000558489600001). <https://doi.org/10.3390/pr8070868>
- Havrysh, V., Kalinichenko, A., Pysarenko, P., & Samojlik, M. (2023). Sunflower Residues-Based Biorefinery: Circular Economy Indicators. *Processes*, 11(2). Scopus. <https://doi.org/10.3390/pr11020630>

- Jaimés-Estévez, J., Zafra, G., Martí-Herrero, J., Pelaz, G., Morán, A., Puentes, A., Gomez, C., Castro, L. D. P., & Escalante Hernández, H. (2020). Psychrophilic Full Scale Tubular Digester Operating over Eight Years: Complete Performance Evaluation and Microbiological Population. *Energies*, *14*(1), 151. <https://doi.org/10.3390/en14010151>
- Janssen, R., & Rutz, D. D. (2011). Sustainability of biofuels in Latin America: Risks and opportunities. *Energy Policy*, *39*(10), 5717-5725. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.047>
- Jasper, M., Rafati, N., Schimmel, K., Shahbazi, A., Li, F., Mba-Wright, M., & Wang, L. (2022). Carbon negative transportation fuels—A techno-economic-environmental analysis of biomass pathways for transportation. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT-X*, *14*. (WOS:000796505500001). <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100208>
- Kasperski, S., Bosman, C., Petersen, A., Görgens, J., & van Rensburg, E. (2025). Bioconversion of Steam-Exploded Sugarcane Bagasse to Microbial Protein: An Experimental Investigation and Techno-Economic Analysis. *WASTE AND BIOMASS VALORIZATION*. (WOS:001502625700001). <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03152-z>
- Kehili, M., Schmidt, L. M., Reynolds, W., Zammel, A., Zetzel, C., Smirnova, I., Allouche, N., & Sayadi, S. (2016). Biorefinery cascade processing for creating added value on tomato industrial by-products from Tunisia. *Biotechnology for Biofuels*, *9*(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0676-x>
- Lap, T., Benders, R., Köberle, A., van der Hilst, F., Nogueira De Oliveira, L., Szklo, A., Schaeffer, R., & Faaij, A. (2019). Pathways for a Brazilian biobased economy: Towards optimal utilization of biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *13*(3), 673-689. Scopus. <https://doi.org/10.1002/bbb.1978>

- Li, Y., Bhagwat, S., Cortés-Peña, Y., Ki, D., Rao, C., Jin, Y., & Guest, J. (2021). Sustainable Lactic Acid Production from Lignocellulosic Biomass. *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, 9(3), 1341-1351. (WOS:000613726300030). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08055>
- Liao, C., Guan, Y., & Bustamante-Román, M. (2022). Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Pineapple Leaves Utilization in Costa Rica. *ENERGIES*, 15(16). (WOS:000845984800001). <https://doi.org/10.3390/en15165784>
- Liu, C., Wang, K., Zhao, X., Chen, Z., Yin, X., Cai, T., Zhang, X., Xu, J., Hu, J., Meng, X., Ragauskas, A., & Jiang, J. (2023). Integrated lignocellulosic biorefinery for efficient production of furans and photothermal materials. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 453. (WOS:000892205700003). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139688>
- Louw, J., Farzad, S., & Görgens, J. F. (2023). Polyethylene furanoate: Technoeconomic analysis of biobased production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(1), 135-152. Scopus. <https://doi.org/10.1002/bbb.2430>
- Martinez-Hernandez, E., Cui, X., Scown, C., Amezcua-Allieri, M., Aburto, J., & Simmons, B. (2019). Techno-economic and greenhouse gas analyses of lignin valorization to eugenol and phenolic products in integrated ethanol biorefineries. *BIOFUELS BIOPRODUCTS & BIOREFINING-BIOFPR*, 13(4), 978-993. (WOS:000476550800012). <https://doi.org/10.1002/bbb.1989>
- Meramo, S. I., Puello, P., & Cabarcas, A. (2021). Technical Evaluation of a Levulinic Acid Plant Based on Biomass Transformation under Techno-Economic and Exergy Analyses. *ACS Omega*, 6(8), 5627-5641. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c06088>

- Meramo, S. I., Sánchez-Tuirán, E., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., & Ojeda, K. A. (2020). Synthesis and Sustainability Evaluation of a Lignocellulosic Multifeedstock Biorefinery Considering Technical Performance Indicators. *ACS Omega*, 5(16), 9259-9275. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00114>
- Mesfun, S., Gustafsson, G., Larsson, A., Samavati, M., & Furusjoe, E. (2023). Electrification of Biorefinery Concepts for Improved Productivity-Yield, Economic and GHG Performances. *ENERGIES*, 16(21). (WOS:001100420300001). <https://doi.org/10.3390/en16217436>
- Michaga, M., Michailos, S., Akram, M., Cardozo, E., Hughes, K., Ingham, D., & Pourkashanian, M. (2022). Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) potential in jet fuel production from forestry residues: A combined Techno-Economic and Life Cycle Assessment approach. *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 255. (WOS:000772626800004). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115346>
- Millán, G., Ashok, R., Oinas, P., Llorca, J., & Sixta, H. (2021). Furfural production from xylose and birch hydrolysate liquor in a biphasic system and techno-economic analysis. *BIOMASS CONVERSION AND BIOREFINERY*, 11(5), 2095-2106. (WOS:000556994400002). <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00702-4>
- Mokomele, T., da Costa Sousa, L., Bals, B., Balan, V., Goosen, N., Dale, B. E., & Görgens, J. F. (2018). Using steam explosion or AFEXTM to produce animal feeds and biofuel feedstocks in a biorefinery based on sugarcane residues. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(6), 978-996. Scopus. <https://doi.org/10.1002/bbb.1927>
- Msiska, S., Padi, R., & Chimphango, A. (2024). Process simulation and assessment of the impact of satellite biorefineries and product diversification on the economic and environmental

- performance of energy-targeted biorefineries. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 469. (WOS:001282629800001). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143221>
- Muneer, F., Hovmalm, H. P., Svensson, S.-E., Newson, W. R., Johansson, E., & Prade, T. (2021). Economic viability of protein concentrate production from green biomass of intermediate crops: A pre-feasibility study. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126304. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126304>
- NaderiNasrabadi, M., Rakshit, S., Viswanathan, G., Chen, Z., Harrington, P., & Staser, J. (2021). A Techno-economic Analysis for Integrating an Electrochemical Reactor into a Lignocellulosic Biorefinery for Production of Industrial Chemicals and Hydrogen. *APPLIED BIOCHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY*, 193(3), 791-806. (WOS:000589037000001). <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03452-1>
- Nickel, D., Fornell, R., Janssen, M., & Franzén, C. (2020). Multi-Scale Variability Analysis of Wheat Straw-Based Ethanol Biorefineries Identifies Bioprocess Designs Robust Against Process Input Variations. *FRONTIERS IN ENERGY RESEARCH*, 8. (WOS:000535986300001). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00055>
- Ninõ-Villalobos, A., Puello-Yarce, J., González-Delgado, A. D., Ojeda, K. A., & Sánchez-Tuirán, E. (2020). Biodiesel and Hydrogen Production in a Combined Palm and Jatropha Biomass Biorefinery: Simulation, Techno-Economic, and Environmental Evaluation. *ACS Omega*, 5(13), 7074-7084. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03049>
- Obydenkova, S., Defauw, L., Kouris, P., Smeulders, D., Boot, M., & van der Meer, Y. (2022). Environmental and Economic Assessment of a Novel Solvolysis-Based Biorefinery Producing Lignin-Derived Marine Biofuel and Cellulosic Ethanol. *ENERGIES*, 15(14). (WOS:000832035800001). <https://doi.org/10.3390/en15145007>

- Obydenkova, S., Kouris, P., Smeulders, D., Boot, M., & van der Meer, Y. (2022). Evaluation of environmental and economic hotspots and value creation in multi-product lignocellulosic biorefinery. *BIOMASS & BIOENERGY*, 159. (WOS:000788719600001). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106394>
- Ocampo Batlle, E. A., Escobar Palacio, J. C., Silva Lora, E. E., Bortoni, E., Nogueira, L. A., Carrillo Caballero, G. E., Vitoriano Julio, A. A., & Cárdenas Escorcia, Y. C. (2021). Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 311. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127638>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Ortiz-Sánchez, M., & Cardona, C. A. (2022). Analysis of the routes for biomass processing towards sustainable development in the conceptual design step: Strategy based on the compendium of bioprocesses portfolio. *Bioresource Technology*, 350. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126852>
- Ortiz-Sánchez, M., Piedrahita-Rodríguez, S., Solarte-Toro, J. C., Moustakas, K., & Cardona-Alzate, C. A. (2024). Sustainability analysis of biorefineries applying biotechnological routes to convert bagasse from non-centrifugal sugar production for rural economic development in Colombia. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05452-1>
- Pandey, R., Nahar, N., Pryor, S., & Pourhashem, G. (2021). Cost and Environmental Benefits of Using Pelleted Corn Stover for Bioethanol Production. *ENERGIES*, 14(9). (WOS:000650297100001). <https://doi.org/10.3390/en14092528>

- Pang, B., Sun, Z., Wang, L., Chen, W., Sun, Q., Cao, X., Shen, X., Xiao, L., Yan, J., Deuss, P., Yuan, T., & Sun, R. (2021). Improved value and carbon footprint by complete utilization of corncob lignocellulose. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 419. (WOS:000663662600004). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129565>
- Patel, R., Rajaraman, T. S., Rana, P. H., Ambegaonkar, N. J., & Patel, S. (2025). A review on techno-economic analysis of lignocellulosic biorefinery producing biofuels and high-value products. *Results in Chemistry*, 13, 102052. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102052>
- Patrizi, N., Bruno, M., Saladini, F., Parisi, M. L., Pulselli, R. M., Bjerre, A. B., & Bastianoni, S. (2020). Sustainability Assessment of Biorefinery Systems Based on Two Food Residues in Africa. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.522614>
- Petig, E., Rudi, A., Angenendt, E., Schultmann, F., & Bahrs, E. (2019). Linking a farm model and a location optimization model for evaluating energetic and material straw valorization pathways-A case study in Baden-Wuerttemberg. *GLOBAL CHANGE BIOLOGY BIOENERGY*, 11(1), 304-325. (WOS:000458287800022). <https://doi.org/10.1111/gcbb.12580>
- Piedrahita-Rodríguez, S., Alzate-Ramírez, A.-F., Baumberger, S., Cézard, L., Ortiz-Sánchez, M., Escobar-García, D. A., Zetty-Arenas, A. M., Moustakas, K., & Cardona-Alzate, C. A. (2024). Strategy for the analysis of lignocellulosic biomass to select a viable transformation route in the Colombian context. *Environmental Science and Pollution Research*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32975-x>
- Pinheiro, L., Longati, A., Elias, A., Perez, C., Pereira, L., Zangirolami, T., Furlan, F., Giordano, R., & Milessi, T. (2025). Improving the Feasibility of 2G Ethanol Production from

- Lignocellulosic Hydrolysate Using Immobilized Recombinant Yeast: A Technical-Economic Analysis and Life Cycle Assessment. *FERMENTATION-BASEL*, 11(3). (WOS:001452363300001). <https://doi.org/10.3390/fermentation11030116>
- Poveda-Giraldo, J. A., & Cardona, C. A. (2023). Analysis of Sequential Pretreatments to Enhance the Early-Stage Biorefinery Designs. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app13116758>
- Prasertsilp, P., Pattaragulwanit, K., Kim, B. S., & Napathorn, S. C. (2023). Microwave-assisted cassava pulp hydrolysis as food waste biorefinery for biodegradable polyhydroxybutyrate production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1131053>
- Queiroz, S., Jofre, F., Mussatto, S., & Felipe, M. (2022). Scaling up xylitol bioproduction: Challenges to achieve a profitable bioprocess. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 154. (WOS:000714449500007). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111789>
- Quintero-Naucil, M., Salcedo-Mendoza, J., Solarte-Toro, J. C., & Aristizábal-Marulanda, V. (2024). Assessment and comparison of thermochemical pathways for the rice residues valorization: Pyrolysis and gasification. *Environmental Science and Pollution Research*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32241-0>
- Rahimi, V., Shafiei, M., & Karimi, K. (2020). Techno-economic study of castor oil crop biorefinery: Production of biodiesel without fossil-based methanol and lignoethanol improved by alkali pretreatment. *Agronomy*, 10(10). Scopus. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101538>
- Ramos, A. F., & Kempka, A. P. (2024). Bioinformatics for circular economy research decision-making: A case study in obtaining bioactive peptides from *Citrus sinensis* peels via

- limonene synthase analysis. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 6. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100101>
- Rodríguez-López, A., Negro Alvarez, M. J., Fernández-Rojo, J. L., Ballesteros, I., & Moreno, A. D. (2025). Agro-Food and Lignocellulosic Urban Wastes as Sugar-Rich Substrates for Multi-Product Oil-Based Biorefineries. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(13). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/app15137240>
- Rodríguez-Valderrama, S., Escamilla-Alvarado, C., Magnin, J.-P., Rivas-García, P., Valdez-Vazquez, I., & Ríos-Leal, E. (2020). Batch biohydrogen production from dilute acid hydrolyzates of fruits-and-vegetables wastes and corn stover as co-substrates. *Biomass and Bioenergy*, 140. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105666>
- Rodríguez-Valderrama, S., Escamilla-Alvarado, C., Rivas-García, P., Magnin, J.-P., Alcalá-Rodríguez, M., & Garcia-Reyes, R. B. (2020). Biorefinery concept comprising acid hydrolysis, dark fermentation, and anaerobic digestion for co-processing of fruit and vegetable wastes and corn stover. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 28585-28596. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08580-z>
- Santander, S. A. G., Contreras, M. E. L., Aguirre, O. S., & Hevia, M. I. G. (s. f.). *ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DE LA INSTALACIÓN DE UNA BIORREFINERÍA A PARTIR DE RESIDUOS DE MAÍZ EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS*.
- Santos, C., Silva, C., Mussatto, S., Osseweijer, P., van der Wielen, L., & Posada, J. (2018). Integrated 1st and 2nd generation sugarcane bio-refinery for jet fuel production in Brazil: Techno-economic and greenhouse gas emissions assessment. *RENEWABLE ENERGY*, 129, 733-747. (WOS:000440771200007). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.011>

- Santos, D. S., Callefi, M. H. B. M., Ianda, T. F., da Silva Calixto, E. E., Pereira, G. A. G., Toro, J. C. S., Alzate, C. A. C., Pessôa, F. L. P., & Kalid, R. (2025). Small and medium-scale biorefineries: Biomass quantification and its bioeconomic potential in the Southern Coastal Territory of Bahia. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(5), 2726-2746. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35886-7>
- Segatto, M. L., Stahl, A. M., Zanotti, K., & Zuin, V. G. (2022). Green and sustainable extraction of proteins from agro-industrial waste: An overview and a closer look to Latin America. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 37, 100661. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100661>
- Sganzerla, W. G., Tena, M., Sillero, L., Magrini, F. E., Sophiatti, I. V. M., Gaio, J., Paesi, S., Forster-Carneiro, T., Solera del Río, R., & Pérez-García, M. (2023). Application of Anaerobic Co-digestion of Brewery by-Products for Biomethane and Bioenergy Production in a Biorefinery Concept. *Bioenergy Research*, 16(4), 2560-2573. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10605-7>
- Sganzerla, W., Zobot, G., Torres-Mayanga, P., Buller, L., Mussatto, S., & Forster-Carneiro, T. (2021). Techno-economic assessment of subcritical water hydrolysis process for sugars production from brewer's spent grains. *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*, 171. (WOS:000694802000011). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113836>
- Shen, R., Tao, L., & Yang, B. (2019). Techno-economic analysis of jet-fuel production from biorefinery waste lignin. *BIOFUELS BIOPRODUCTS & BIOREFINING-BIOFPR*, 13(3), 486-501. (WOS:000467580000008). <https://doi.org/10.1002/bbb.1952>
- Sillero, L., Morales, A., Fernández-Marín, R., Hernández-Ramos, F., Dávila-Rodríguez, I., Erdocia, X., & Labidi, J. (2021). Life Cycle Assessment of various biorefinery approaches

- for the valorisation of almond shells. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 749-759. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.004>
- Silva-Martínez, R. D., Sanches-Pereira, A., Ortiz, W., Gómez Galindo, M. F., & Coelho, S. T. (2020). The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 156, 509-525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>
- Speight, J. G., & Singh, K. (2014). *Environmental Management of Energy from Biofuels and Biofeedstocks* (1.^a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118915141>
- Stoklosa, R., Orjuela, A., Sousa, L., Uppugundla, N., Williams, D., Dale, B., Hodge, D., & Balan, V. (2017). Techno-economic comparison of centralized versus decentralized biorefineries for two alkaline pretreatment processes. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*, 226, 9-17. (WOS:000397922400002). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.092>
- Taiwo, A. E., Tom-James, A., Falowo, O. A., Okoji, A., Adeyi, O., Olalere, A. O., & Eloka-Eboka, A. (2022). Techno-economic analysis of Cellulase Production by *Trichoderma reesei* in Submerged Fermentation Processes using a Process Simulator. *South African Journal of Chemical Engineering*, 42, 98-105. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.08.001>
- Tan, E., Snowden-Swan, L., Talmadge, M., Dutta, A., Jones, S., Ramasamy, K., Gray, M., Dagle, R., Padmaperuma, A., Gerber, M., Sahir, A., Tao, L., & Zhang, Y. (2017). Comparative techno-economic analysis and process design for indirect liquefaction pathways to distillate-range fuels via biomass-derived oxygenated intermediates upgrading. *BIOFUELS BIOPRODUCTS & BIOREFINING-BIOFPR*, 11(1), 41-66. (WOS:000393455900013). <https://doi.org/10.1002/bbb.1710>

- Thompson, D., Hartley, D., Wiatrowski, M., Klinger, J., Paudel, R., Ou, L., & Cai, H. (2025). Techno-economic and life-cycle analysis of strategies for improving operability and biomass quality in catalytic fast pyrolysis of forest residues. *NEXT ENERGY*, 7. (WOS:001469168400001). <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100225>
- Ubando, A. T., Felix, C. B., & Chen, W.-H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 299, 122585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122585>
- Upcraft, T., Tu, W., Johnson, R., Finnigan, T., Van Hung, N., Hallett, J., & Guo, M. (2021). Protein from renewable resources: Mycoprotein production from agricultural residues. *GREEN CHEMISTRY*, 23(14), 5150-5165. (WOS:000668134300001). <https://doi.org/10.1039/d1gc01021b>
- Valdivia, M., Galán González, J. L., Laffarga, J., & Ramos, J.-L. (2016). Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials. *Microbial Biotechnology*, 9(5), 585-594. Scopus. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12387>
- Vasco-Correa, J., & Shah, A. (2019). Techno-Economic Bottlenecks of the Fungal Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. *FERMENTATION-BASEL*, 5(2). (WOS:000474935500001). <https://doi.org/10.3390/fermentation5020030>
- Vega, L. P., Bautista, K. T., Campos, H., Daza, S., & Vargas, G. (2024). Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia. *Energy Reports*, 11, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.060>
- Vollmer, N., Gernaey, K., & Sin, G. (2022). Conceptual Process Design of an Integrated Xylitol Biorefinery With Value-Added Co-Products. *FRONTIERS IN CHEMICAL*

- ENGINEERING*, 4. (WOS:000992938300001).
<https://doi.org/10.3389/fceng.2022.838478>
- Voogt, J., Humblet-Hua, N., Geerdink, P., Beelen, B., Mulder, W., & Safi, C. (2023). Valorisation of multiple components from residual biomass for food and biofuel applications: A virtual biorefinery evaluation. *FOOD AND BIOPRODUCTS PROCESSING*, 139, 1-10. (WOS:000949948900001). <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.02.002>
- Vural Gursel, I., Dijkstra, J. W., Huijgen, W. J. J., & Ramirez, A. (2019). Techno-economic comparative assessment of novel lignin depolymerization routes to bio-based aromatics. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(4), 1068-1084. Scopus. <https://doi.org/10.1002/bbb.1999>
- Wang, Y., Baral, N., Yang, M., & Scown, C. (2023). Co-Processing Agricultural Residues and Wet Organic Waste Can Produce Lower-Cost Carbon-Negative Fuels and Bioplastics. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 57(7), 2958-2969. (WOS:000936159500001). <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06674>
- Watanabe, M., Morais, E., Cardoso, T., Chagas, M., Junqueira, T., Carvalho, D., & Bonomi, A. (2020). Process simulation of renewable electricity from sugarcane straw: Techno-economic assessment of retrofit scenarios in Brazil. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 254. (WOS:000518890800103). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120081>
- Wendt, L., Wahlen, B., Walton, M., Nguyen, J., Lin, Y., & Brown, R. (2021). Screening of alkali-assisted storage conditions to define the operational window of deacetylation within storage systems in the bioenergy supply chain. *BIOFUELS BIOPRODUCTS &*

- BIOREFINING-BIOFPR*, 15(6), 1888-1899. (WOS:000696225700001).
<https://doi.org/10.1002/bbb.2288>
- Wiranarongkorn, K., Im-orb, K., Patcharavorachot, Y., Maréchal, F., & Arpornwichanop, A. (2023). Comparative techno-economic and energy analyses of integrated biorefinery processes of furfural and 5-hydroxymethylfurfural from biomass residue. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 175. (WOS:000922797600001).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113146>
- Woolf, D., Lehmann, J., Joseph, S., Campbell, C., Christo, F. C., & Angenent, L. T. (2017). An open-source biomass pyrolysis reactor. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(6), 945-954. Scopus. <https://doi.org/10.1002/bbb.1814>
- Zhang, J., Yoo, E., Davison, B., Liu, D., Schaidle, J., Tao, L., & Li, Z. (2021). Towards cost-competitive middle distillate fuels from ethanol within a market-flexible biorefinery concept. *GREEN CHEMISTRY*, 23(23), 9534-9548. (WOS:000716094700001).
<https://doi.org/10.1039/d1gc02854e>

Apéndices

Apéndice A. Protocolo PRISMA

Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
TÍTULO		
Título	1	Identificar la publicación como una revisión sistemática.
RESUMEN		
Resumen estructurado	2	Ver la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020.
INTRODUCCIÓN		
Justificación	3	Describir la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente.
Objetivos	4	Proporcionar una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión.
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especificar los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.
Fuentes de información	6	Enumerar y detallar todas las fuentes de búsqueda utilizadas, incluyendo bases de datos, registros, sitios web y organizaciones, junto con la última fecha de consulta.
Estrategia de búsqueda	7	Mostrar las estrategias de búsqueda detalladas para todas las fuentes, incluyendo filtros y restricciones aplicados.
Proceso de selección de los estudios	8	Describir cómo se evaluaron los estudios para determinar si cumplen con los criterios de inclusión, incluyendo el número de revisores, su independencia y cualquier uso de herramientas de automatización.
Proceso de extracción de los datos	9	Describir cómo se obtuvieron los datos de los informes o publicaciones, incluyendo el número de revisores, su independencia, la validación de los datos por parte de los investigadores del estudio y el uso de herramientas de automatización, si las hubo.
Lista de los datos	10a	Enumerar y explicar todos los resultados buscados, especificando si se incluyeron todos los relacionados con cada aspecto del resultado. en caso de no ser así, explicar el proceso de selección de resultados.
	10b	Enumerar y definir otras variables de interés, como características de participantes e intervención, así como fuentes de financiamiento. Explicitar cualquier suposición realizada sobre datos faltantes o inciertos.

Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Describir los métodos de evaluación del sesgo en los estudios incluidos, incluyendo las herramientas, el número de revisores, su independencia y, si corresponde, detalles sobre la automatización.
Medidas del efecto	12	Indicar las medidas de efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas para cada resultado en la síntesis de los resultados.
Sección/tema	Item	Item de la lista de verificación
Métodos de síntesis	13a	Explicar cómo se seleccionaron los estudios elegibles para la síntesis, como comparar las características de los estudios con los grupos previstos para cada síntesis.
	13b	Describir cualquier método necesario para preparar los datos, como el tratamiento de datos faltantes o conversiones, antes de su presentación o síntesis.
	13c	Describir los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.
	13d	Describir los métodos de síntesis de resultados, justificando las elecciones. en caso de haber un metaanálisis, explicar los modelos, la evaluación de la heterogeneidad y las herramientas informáticas utilizadas.
	13e	Describir los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, metarregresión).
	13f	Describir los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.
Evaluación del sesgo en la publicación	14	Describir los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en las publicaciones).
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describir los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.
RESULTADOS		
Selección de los estudios	16a	Describir los resultados de los procesos de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.
	16b	Citar los estudios que aparentemente cumplían con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.
Características de los estudios	17	Citar cada estudio incluido y presente sus características.

Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presentar las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.
Resultados de los estudios individuales	19	Presentar para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza), idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resumir brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.
Sección/tema	Ítem	Ítem de la lista de verificación
	20b	Mostrar los resultados del metaanálisis, incluyendo el estimador de resumen, su precisión (como intervalos de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describir la dirección del efecto.
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.
Sesgos en la publicación	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos de en las publicaciones) para cada síntesis evaluada.
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.
DISCUSIÓN		
Discusión	23a	Proporcionar una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.
	23b	Argumentar las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.
	23c	Argumentar las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.
	23d	Argumentar las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.
OTRA INFORMACIÓN		
Registro y protocolo	24a	Proporcionar la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de registro, o declarar que la revisión no ha sido registrada.
	24b	Indicar dónde se puede acceder al protocolo, o declarar que no se ha redactado ningún protocolo.
	24c	Describir y explicar cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.

Financiación	25	Describir las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.
Conflicto de intereses	26	Declarar los conflictos de intereses de los autores de la revisión.
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	27	Indicar qué elementos de los siguientes están públicamente disponibles y dónde encontrarlos: plantillas de extracción de datos, datos extraídos de estudios incluidos, datos para análisis, código de análisis y otros materiales utilizados en la revisión.

Apéndice B. Componentes Biomasa

Biomasa	Celulosa [%]	Hemicelulosa [%]	Lignina [%]	Otras [%]	Fuente
<i>Corn Stover</i>	35.92	25.35	17.29	22.52	(Baral & Shah, 2017)
<i>Sugarcane</i>	40.7	27.1	21.9	10.3	(Louw et al., 2023)
<i>Leaf Pineapple</i>	22.6	26.1	7.3	44	(Liao et al., 2022)
<i>Wheat straw</i>	32.5	23.76	16.1	27.64	(Beisl et al., 2019)
<i>Rice Straw</i>	35.3	22.8	17.5	24.4	(Carmo-Calado, Hermoso-Orzáez, et al., 2023)
<i>Blackberry pulp</i>	41.74	19.80	19.22	19.24	(Dávila et al., 2017)
<i>Coffee Cut-Stems</i>	40.39	34.01	10.13	15.47	(García-Velásquez et al., 2017)
<i>Banana empty fruit bunches</i>	51.85	16.05	14.81	17.29	(Meramo et al., 2021)
<i>African Palm the empty fruit bunches</i>	38.8	35.64	25.25	0	(Ninõ-Villalobos et al., 2020)
<i>Palm pressing fiber from African Palm</i>	32.7	28.5	38.7	0	(Ninõ-Villalobos et al., 2020)
<i>Residues Corncob</i>	31.8	28.9	12.5	26.8	(Pandey et al., 2021)

<i>Cassava Pulp</i>	25.4	6.1	5.8	62	(Poveda-Giraldo & Cardona, 2023)
<i>Hardwood</i>	35.2	16.6	23.9	24.3	(Vasco-Correa & Shah, 2019)

Apéndice C. Rutas de conversión

1. Rutas de Conversión

1.1. Rutas bioquímicas

Las rutas bioquímicas reúnen procesos en los que la transformación de la biomasa ocurre por acción de microorganismos, consorcios microbianos o enzimas, generalmente en medios acuosos y bajo condiciones relativamente suaves; según el tipo de proceso, la salida puede ser un combustible, un gas, un químico de plataforma, biomasa microbiana o incluso un biocatalizador (Abdullah et al., 2016; Almeida et al., 2023; Taiwo et al., 2022).

1.1.1. Fermentación

La fermentación comprende procesos de conversión biológica en los que microorganismos transforman compuestos orgánicos en productos de interés bajo condiciones controladas; dentro de la revisión, esta ruta no solo se asocia a biocombustibles, sino también a compuestos químicos, biomateriales y biomasa microbiana (Abdullah et al., 2016; Bhagwat et al., 2021; Li et al., 2021; Rodríguez-López et al., 2025).

1.1.1.1. *Fermentación alcohólica.*

En este proceso las levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* y, en algunos casos, *Kluyveromyces marxianus* convierten los azúcares disponibles en etanol, generando además CO₂ y corrientes residuales del proceso (Abdullah et al., 2016; Correia et al., 2024; Mesfun et al., 2023).

1.1.1.2. *Sacarificación y fermentación simultánea (SSF).*

En este esquema integra en una misma etapa la hidrólisis enzimática y la fermentación, de manera que los azúcares liberados se consumen casi de inmediato y el producto principal sigue siendo etanol (Castro et al., 2025; Mesfun et al., 2023; Nickel et al., 2020).

1.1.1.3. *Fermentación ABE.*

En esta subruta, las bacterias del género *Clostridios*, especialmente *C. acetobutylicum* y *C. beijerinckii*, transforman el sustrato en una mezcla de acetona, butanol y etanol, por lo que se diferencia de la fermentación alcohólica en que produce varios solventes y no solo etanol (Dudek et al., 2025; Meramo et al., 2020).

1.1.1.4. *Fermentación oscura.*

La fermentación oscura se desarrolla con bacterias anaerobias como *Clostridium spp.* y *Enterobacter spp.*, que degradan la materia orgánica en ausencia de luz para producir biohidrógeno, junto con CO₂ y ácidos orgánicos volátiles (Rodríguez-Valderrama, Escamilla-Alvarado, Magnin, et al., 2020; Rodríguez-Valderrama, Escamilla-Alvarado, Rivas-García, et al., 2020).

1.1.1.5. *Fermentación para ácidos orgánicos.*

Cuando la fermentación utiliza microorganismos como *Lactobacillus spp.*, *Bacillus coagulans*, *Actinobacillus succinogenes* o *Aspergillus terreus* convierten el sustrato en moléculas como ácido láctico, succínico o itacónico (Bhagwat et al., 2021; Escanciano et al., 2025; Li et al., 2021).

1.1.1.6. Fermentación para Xilitol.

En esta variante, levaduras del género *Candida* transforman preferentemente xilosa en xilitol, por lo que se trata de una fermentación orientada a la obtención de un poliol (Castro et al., 2025; Queiroz et al., 2022; Vollmer et al., 2022).

1.1.1.7. Fermentación para proteína microbiana.

En esta subruta, microorganismos como *Fusarium venenatum*, además de ciertas levaduras y bacterias, utilizan el sustrato para formar biomasa celular, de manera que el producto principal es la proteína microbiana (Gómez et al., 2022; Kasperski et al., 2025; Upcraft et al., 2021).

1.1.1.8. Fermentación para polihidroxibutirato (PHB) o biopolímeros microbianos.

En esta fermentación bacterias como *Cupriavidus necator* y algunas especies de *Bacillus* acumulan intracelularmente biopolímeros como PHB durante el cultivo, por lo que la salida del proceso es una biomasa rica en material biodegradable que luego debe recuperarse (Beisl et al., 2019; Prasertsilp et al., 2023).

1.1.1.9. Fermentación para aceite microbiano.

En esta levaduras oleaginosas como *Arropía lipolytica*, *Rhodospiridium toruloides* o *Lipomyces starkeyi* convierten el sustrato en lípidos intracelulares, produciendo biomasa rica en aceite microbiano y, en algunos casos, coproductos como carotenoides (Rodríguez-López et al., 2025).

1.1.2. Digestión anaerobia

En la digestión anaerobia entra materia orgánica biodegradable y actúa un consorcio microbiano compuesto por bacterias hidrolíticas, acidogénicas y acetogénicas, junto con arqueas metanogénicas; durante el proceso, la materia orgánica se descompone y la salida principal es

biogás o biometano, acompañado de digestato con potencial de valorización posterior (Almeida et al., 2023; Burbano-Cuasapud et al., 2023; W. G. Sganzerla et al., 2023).

1.1.3. Co-Digestión anaerobia

En la co-digestión anaerobia ingresan simultáneamente dos o más corrientes orgánicas y el mismo consorcio anaerobio las transforma de manera conjunta; la principal diferencia frente a la digestión anaerobia convencional es que la mezcla de sustratos busca mejorar la estabilidad del proceso y el rendimiento de biogás o biometano, manteniendo también una corriente final de digestato [67], [108].

1.1.4. Conversión Microbiana de Lignina

En esta subruta entran corrientes aromáticas derivadas de la lignina ya solubilizada o parcialmente despolimerizada, que luego son transformadas por microorganismos capaces de metabolizar estos compuestos; así, la salida deja de ser la lignina como tal y pasa a ser un conjunto de moléculas de mayor valor, normalmente aromáticos o químicos especializados (Abdelaziz et al., 2020).

1.2. Rutas químicas y catalíticas

Las rutas químico-catalíticas comprenden procesos en los que la valorización de la biomasa depende principalmente de transformaciones químicas selectivas o catalíticas dirigidas a fracciones específicas, especialmente lignina e intermediarios plataforma para obtener combustibles, compuestos plataforma o moléculas de mayor valor agregado (Abdelaziz et al., 2020; Arts et al., 2023; Ebrahimpourboura et al., 2024).

1.2.1. Transesterificación

En este proceso entran aceites o triglicéridos y un alcohol, y mediante reacción catalítica se convierten en ésteres de ácidos grasos produciendo principalmente biodiésel, acompañado de

glicerol como coproducto (Ninõ-Villalobos et al., 2020; Ocampo Batlle et al., 2021; Rahimi et al., 2020)

1.2.2. Esterificación

En la esterificación entran un ácido carboxílico y un alcohol, que reaccionan para formar un éster; así, la salida del proceso es un compuesto esterificado de interés, como etil levulinato u otros derivados, junto con corrientes secundarias del medio de reacción (Msiska et al., 2024; Obydenkova, Defauw, et al., 2022).

1.2.3. Deshidratación catalítica

En esta subruta entran azúcares o intermediarios oxigenados y, por acción del catalizador, se elimina agua de la molécula y la salida son compuestos deshidratados como furfural, HMF u otros intermediarios químicos de plataforma (Athaley et al., 2019; Blanco-Cejas et al., 2025; Millán et al., 2021).

1.2.4. Despolimerización oxidativa de lignina

Aquí entra lignina y, en presencia de un agente oxidante, su estructura polimérica se fragmenta; como resultado salen compuestos aromáticos de menor peso molecular y mayor valor, como vainillina, ácido vainílico, guayacol o acetovainillona (Abdelaziz et al., 2020)

1.2.5. Fraccionación catalítica reductora (RCF)

En la RCF entra biomasa lignocelulósica junto con solvente y catalizador, y durante el proceso la lignina se solubiliza, se fragmenta y sus intermediarios se estabilizan de forma reductiva; la salida suele ser una fracción líquida rica en compuestos fenólicos y una pulpa sólida enriquecida en carbohidratos (Arts et al., 2023; Bartling et al., 2021).

1.2.6. Hidrogenólisis catalítica

En esta ruta entran compuestos oxigenados, especialmente derivados de lignina, y en presencia de hidrógeno y catalizador se rompen enlaces C-O y la salida son moléculas fenólicas o aromáticas más simples y de mayor aprovechamiento químico (Martinez-Hernandez et al., 2019).

1.2.7. Hidrogenación

En la hidrogenación entran compuestos insaturados u oxigenados y reaccionan con hidrógeno sobre un catalizador; la salida son productos más saturados y estables, que pueden servir como intermediarios químicos o como precursores de combustibles (N. M. Clauser et al., 2021; Dutta et al., 2023; Zhang et al., 2021).

1.2.8. Hidrotratamiento / hidrodeshidrogenación

En esta subruta entran aceites o corrientes ricas en compuestos oxigenados y, mediante tratamiento con hidrógeno, se reduce su contenido de oxígeno produciendo hidrocarburos más compatibles con combustibles líquidos, especialmente en aplicaciones como SAF o combustibles de rango diésel y jet (Batten et al., 2024; Shen et al., 2019; Tan et al., 2017).

1.2.9. Isomerización

En la isomerización entran moléculas plataforma ya formadas y ocurre un reordenamiento estructural sin cambiar su fórmula global produciendo isómeros más adecuados para etapas posteriores de conversión o para obtener productos finales específicos (Liu et al., 2023; Louw et al., 2023).

1.2.10. Oxidación catalítica

Aquí entran intermediarios orgánicos y, mediante reacción de oxidación, se incorporan o transforman grupos funcionales en compuestos más oxigenados, como ácidos u otros productos químicos de interés (Ebrahimpourboura et al., 2024; Hafyan et al., 2020; Louw et al., 2023).

1.2.11. Solvolisis

En la solvolisis entra biomasa o una fracción enriquecida en lignina y el solvente participa directamente en la ruptura de la estructura produciendo fracciones solubilizadas y compuestos derivados que pueden destinarse a combustibles o químicos (Obydenkova, Defauw, et al., 2022).

1.2.12. Conversión electroquímica

En esta ruta entran corrientes líquidas o compuestos orgánicos susceptibles de oxidación o reducción en un reactor electroquímico; durante el proceso la corriente eléctrica impulsa la transformación química y la salida puede incluir hidrógeno, compuestos aromáticos oxidados o moléculas de mayor valor agregado (Ebrahimpourboura et al., 2024; NaderiNasrabadi et al., 2021).

1.2.13. Oligomerización

En este proceso entran olefinas u otros compuestos pequeños y, por acción catalítica, se combinan para formar moléculas de mayor tamaño; la salida son fracciones más pesadas, útiles como precursores de combustibles líquidos (Tan et al., 2017; Zhang et al., 2021).

1.2.14. Metanación

En este proceso entran corrientes gaseosas ricas en CO, CO₂ e hidrógeno, que reaccionan catalíticamente para formar metano; la salida es biometano o gas natural sintético, con valor energético directo (Carmo-Calado, Mota-Panizio, et al., 2023).

1.3. Termoquímicas

Las rutas termoquímicas reúnen procesos en los que la biomasa se transforma por efecto del calor, con o sin presencia controlada de oxígeno, de vapor o de agentes reactivos; según la severidad de operación y el medio de reacción, la salida puede ser un gas combustible, un aceite, un sólido carbonoso, calor útil o electricidad (Bressanin et al., 2020; Quintero-Naucil et al., 2024; Watanabe et al., 2020).

1.3.1. Síntesis Fischer-Tropsch

En este proceso entra una corriente de syngas rica en CO y H₂ y sobre un catalizador, esos gases se recombinan para formar hidrocarburos de mayor longitud; así, la salida deja de ser un gas intermedio y pasa a convertirse en fracciones líquidas o cerosas que pueden destinarse a combustibles (Bressanin et al., 2020; Jasper et al., 2022; Michaga et al., 2022).

1.3.2. Pirólisis

Este proceso ocurre cuando la biomasa se calienta en ausencia total o casi total de oxígeno, de modo que su estructura se rompe térmicamente y da lugar a una mezcla de fracción líquida, gases y un sólido carbonoso; lo que cambia entre sus variantes no es el principio general, sino la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y, en algunos casos, el uso de catalizadores o de calor autogenerado (Quintero-Naucil et al., 2024; Woolf et al., 2017).

1.3.2.1. *Pirólisis rápida.*

En este subtipo de pirólisis la biomasa se somete a calentamiento intenso y tiempos de residencia muy cortos, con lo cual se favorece la formación de vapores condensables; la salida principal suele ser bioaceite, acompañado de gases y cantidades menores de biochar (Mesfun et al., 2023; Quintero-Naucil et al., 2024).

1.3.2.2. *Pirólisis lenta.*

En este proceso el calentamiento es más gradual y el tiempo de residencia es mayor, por lo que el proceso favorece la carbonización del material; en consecuencia, la salida más representativa es biochar, junto con líquidos y gases en menor proporción (Ghysels et al., 2020).

1.3.2.3. *Pirólisis catalítica rápida.*

En esta variante, además del calentamiento rápido, se incorpora un catalizador que modifica la composición de los vapores formados; así, la salida ya no es solo bioaceite en bruto, sino una corriente líquida parcialmente mejorada y más adecuada para etapas posteriores de conversión (Dutta et al., 2023; Thompson et al., 2025).

1.3.2.4. *Pirólisis autotérmico.*

En este una parte del calor necesario se genera dentro del mismo sistema mediante oxidación parcial controlada, lo que reduce la necesidad de aporte térmico externo; la salida sigue siendo una combinación de bioaceite, gases y sólidos carbonosos, pero bajo un esquema energéticamente más integrado (Ganguly et al., 2022).

1.3.3. Licuefacción hidrotérmica (HTL)

En HTL entra biomasa húmeda y el proceso ocurre en agua, a alta temperatura y presión, sin necesidad de secado completo previo; la salida principal es un biocrudo, acompañado de fase acuosa, gases y una fracción sólida residual (Mesfun et al., 2023).

1.3.4. *Combustión*

En este paso entra biomasa y, al reaccionar con exceso de oxígeno, su materia orgánica se oxida casi por completo; la salida es principalmente calor, junto con gases de combustión y cenizas (Havrysh et al., 2023; Petig et al., 2019; Watanabe et al., 2020).

1.3.5. Cogeneración

En este proceso entra un combustible sólido, gaseoso o líquido de origen biogénico y el sistema aprovecha simultáneamente la energía térmica y la eléctrica generadas durante su uso; por eso, la salida no es un solo producto energético, sino electricidad y calor útil dentro del mismo esquema (Havrysh et al., 2023; Watanabe et al., 2020).

1.3.6. Reformado de vapor

En el reformado de vapor entran compuestos gaseosos o líquidos ricos en carbono junto con vapor de agua y, a alta temperatura, se transforman en una corriente más rica en hidrógeno y monóxido de carbono produciendo entonces un gas de síntesis o una corriente enriquecida en H₂ apta para valorización posterior (Ninõ-Villalobos et al., 2020).

1.3.7. Reformado autotérmico

En el reformado autotérmico entran compuestos carbonosos, vapor y una cantidad controlada de oxígeno, de modo que el propio sistema combina reacciones exotérmicas y endotérmicas para sostener el balance térmico; la salida es una corriente gaseosa rica en syngas o hidrógeno, sin depender totalmente de calor externo (Jasper et al., 2022).

1.4. Rutas Físicas

Esta rutas agrupan procesos en los que la biomasa no se transforma químicamente de manera principal, sino que sus componentes se separan o concentran aprovechando diferencias de solubilidad, volatilidad o comportamiento de fase; por eso, la salida suele ser una o varias fracciones valorizables más que una molécula nueva formada por reacción (Agraso-Otero et al., 2025; Bedoya Betancur et al., 2021; Kehili et al., 2016).

1.4.1. Extracción

Esta ruta reúne procesos en los que una fracción específica de la biomasa se separa mediante un medio que la solubiliza o la remueve selectivamente, sin que ocurra una transformación química principal del material se puede clasificar según el sistema empleado, esta recuperación puede realizarse con solventes convencionales, etanol, CO₂ supercrítico o mediante esquemas secuenciales, y la salida es un extracto enriquecido en los compuestos de interés junto con una fracción residual que aún puede valorizarse en otras etapas.(Agraso-Otero et al., 2025; Kehili et al., 2016; Voogt et al., 2023).

1.4.2. Arrastre / destilación por vapor

En este caso entra una biomasa rica en compuestos volátiles y el vapor actúa arrastrando esas sustancias fuera de la matriz sólida; tras la condensación, la salida es una fracción rica en aceites esenciales o compuestos aromáticos, junto con una fase acuosa y un residuo sólido que todavía puede aprovecharse en otras rutas (Bedoya Betancur et al., 2021; Carmo-Calado, Mota-Panizio, et al., 2023).

1.5. Rutas combinadas

Las rutas combinadas corresponden a esquemas de biorrefinerías que reúne diferentes configuraciones, quiere decir que no depende de una sola vía de conversión, si no de la articulación secuencial o paralela de dos o más rutas físicas, bioquímicas, químico-catalíticas o termoquímicas para aprovechar de forma más completa las diferentes fracciones de la biomasa. En esta categoría, el pretratamiento adquiere un papel especialmente estratégico, porque deja de responder a una sola plataforma y pasa a definir cómo se distribuyen sólidos, líquidos e intermediarios dentro del sistema integrado (Carmo-Calado, Mota-Panizio, et al., 2023; Ghysels et al., 2020; C. Santos et al., 2018).