



Revisión bibliográfica sobre los principales retos en la gestión de proyectos de generación de energía renovable a partir de biomasa en Colombia

Luis Rafael De la Rosa Ramos

**Corporación Universitaria Minuto de Dios
Rectoría Virtual
Programa Especialización en Gerencia de Proyectos
2025**

Revisión bibliográfica sobre los principales retos en la gestión de proyectos de generación de energía renovable a partir de biomasa en Colombia

Luis Rafael De la Rosa Ramos

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesora

Doris Amanda Rosero García

Microbióloga, M.Sc., PhD.

Posdoctorado en Microbiología Ambiental

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

2025

Contenido

Lista de tablas.....	5
Lista de figuras.....	6
Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1 Descripción del problema	11
1.2 La pregunta de investigación	13
1.3 Los objetivos de investigación	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Justificación de la investigación.....	14
2. MARCO DE REFERENCIA.....	16
2.1. Marco de Antecedentes	16
2.2. Marco Teórico	17
2.2.1 Biomasa	17
2.2.2 Procesos para el aprovechamiento de biomasa.....	18
2.2.3 Energía.....	18
2.3. Marco normativo	18
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Enfoque y alcance de la investigación	20
3.2. Población y muestra	20
3.2.1. Definición de la población.....	20
3.2.2. Cálculo y selección de la muestra.....	21
3.3. Instrumento.....	22
3.4. Descripción de procedimientos	22
3.5. Consideraciones éticas	23
3.5.1. Análisis de consideraciones éticas	23
4. RESULTADOS.....	24

4.1. Estudios científicos identificados en la temática.....	24
4.2. Principales retos identificados.....	27
4.3. Alternativas y estrategias identificadas para superar los retos	35
5. DISCUSIÓN.....	38
6. CONCLUSIONES	42
7. RECOMENDACIONES.....	43
REFERENCIAS	44

Lista de tablas

Tabla 1. Etapas planeadas para la revisión de literatura	20
Tabla 2. Matriz de análisis documental propuesta para la recolección de datos en el estudio...	22
Tabla 3. Frecuencia de la dimensión estudiada en los documentos seleccionados	26
Tabla 4. Principales retos identificados en la literatura consultada para proyectos energéticos de fuentes renovables.....	28
Tabla 5. Síntesis de estrategias para abordar los retos identificados en proyectos energéticos de fuentes renovables.....	35
Tabla 6. Estrategias priorizadas para proyectos de bioenergía en Colombia según fase del ciclo de proyecto	36

Lista de figuras

Figura 1. Número de publicaciones conforme a los criterios de búsqueda por (a) año y (b) país25

Resumen

La transición energética en Colombia exige diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles, lo que posiciona a la biomasa como una fuente renovable con alto potencial a partir del aprovechamiento de residuos agroindustriales, forestales, ganaderos y urbanos. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar los principales retos técnicos, normativos, económicos, sociales y ambientales que enfrentan los proyectos de generación de energía a partir de biomasa en Colombia, e identificar alternativas y estrategias que favorezcan su implementación sostenible desde la perspectiva de la gerencia de proyectos. Se desarrolló una investigación cualitativa, descriptiva y documental mediante una revisión sistemática de literatura, con búsqueda en la base de datos *Scopus* para el periodo 2015–2025. Tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 30 artículos relacionados con biomasa y otras fuentes renovables comparables, cuya información se organizó en una matriz de análisis según cinco dimensiones: técnica, económica, social, ambiental y normativa. Los resultados muestran que los proyectos de bioenergía enfrentan barreras recurrentes como altos costos de inversión, dificultades de acceso a financiamiento, percepción elevada de riesgo, marcos regulatorios complejos, débil coordinación institucional, conflictos socioambientales y brechas tecnológicas y logísticas en la cadena de suministro de biomasa. A partir de estos hallazgos se proponen estrategias articuladas que incluyen el uso de metodologías de evaluación multicriterio, el fortalecimiento de instrumentos financieros y esquemas de alianzas público–privadas, la mejora de los procesos de participación comunitaria y consulta, y la incorporación de enfoques de sostenibilidad y ciclo de vida a lo largo del ciclo del proyecto, con el fin de consolidar la bioenergía como un componente estratégico de la transición energética del país.

Palabras clave: Biomasa, gestión de proyectos, Colombia, energías renovables, retos

Abstract

The energy transition in Colombia requires diversifying the energetic mix and reducing dependence on fossil fuels, which positions biomass as a renewable source with high potential through the recovery of agricultural, forestry, livestock and urban residues. In this context, the aim of this work is to analyze the main technical, regulatory, economic, social and environmental challenges faced by biomass-based power generation projects in Colombia and to identify alternatives and strategies that can foster their sustainable implementation from a project management perspective. A qualitative, descriptive and documentary research design was adopted, based on a systematic literature review, with a search strategy applied to the Scopus database for the 2015–2025 period. After applying inclusion and exclusion criteria, 30 articles related to biomass and other comparable renewable energy sources were selected, and the information was organized in an analysis matrix according to five dimensions: technical, economic, social, environmental, and regulatory. The results show that bioenergy projects face recurrent barriers such as high upfront investment costs, limited access to finance, strong risk perception, complex regulatory frameworks, weak institutional coordination, socio-environmental conflicts, and technological and logistical gaps along the biomass supply chain. Based on these findings, the study proposes an articulated set of strategies, including the use of multi-criteria assessment methods, the strengthening of financial instruments and public–private partnership schemes, the improvement of community participation and consultation processes, and the incorporation of sustainability and life-cycle approaches throughout the project cycle, in order to consolidate bioenergy as a strategic component of the country's energy transition.

Keywords: Biomass, project management, Colombia, renewable energy, challenges

Introducción

En las últimas décadas, la aceleración del cambio climático y el incremento sostenido de las emisiones de CO₂ han hecho urgente la transición desde una matriz energética basada en combustibles fósiles hacia fuentes renovables más limpias y sostenibles. Entre 1970 y 2019, las emisiones globales de CO₂ prácticamente se triplicaron, pasando de 4.693 a 11.771 megatoneladas, lo que refleja la fuerte dependencia del sistema energético mundial de los combustibles fósiles y sus impactos ambientales asociados (Prieto et al., 2025). En este contexto, América Latina y Colombia han avanzado en la formulación de políticas de transición energética, pero aún enfrentan barreras financieras, tecnológicas e institucionales que ralentizan el despliegue de las energías renovables (Chavarry Galvez & Revinova, 2025).

Dentro del conjunto de fuentes renovables, la biomasa se destaca por su capacidad de aprovechar residuos agroindustriales, forestales, ganaderos y urbanos para generar electricidad, calor y biocombustibles, mediante procesos termoquímicos y biológicos como combustión, gasificación, pirólisis y digestión anaerobia (Pérez et al., 2012; Quintero & Quintero, 2015). Esta característica la convierte en una alternativa estratégica para países con alta disponibilidad de residuos orgánicos, como Colombia, donde gran parte de estos materiales aún se dispone en rellenos sanitarios o se gestiona de forma inadecuada, generando impactos ambientales y desaprovechando su potencial energético. A pesar de ello, la participación de la biomasa en la matriz eléctrica nacional sigue siendo marginal frente a otras fuentes como la hidroenergía, la solar y la eólica (López, 2017; Rocha et al., 2022).

Diversos trabajos han mostrado que el desarrollo de proyectos de bioenergía enfrenta un conjunto de retos multidimensionales. Se puede indicar que se requieren metodologías robustas para evaluar la viabilidad de plantas de cogeneración y garantizar el suministro sostenible de biomasa, como lo evidencian estudios de aprovechamiento de palma de aceite en regiones tropicales (de Oliveira et al., 2015). En la dimensión normativa y de política pública, la Ley 1715 de 2014 y sus desarrollos posteriores han sentado las bases para la integración de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) (incluida la biomasa) mediante incentivos fiscales y mecanismos de promoción (Congreso de Colombia, 2014; República de Colombia, 2015, 2024). Sin embargo, persisten barreras regulatorias, dificultades en las zonas no interconectadas y una baja participación de proyectos de biomasa en el portafolio de iniciativas registradas ante la UPME (Rocha et al., 2022; Villada Duque et al., 2017).

Pese a estos aportes, se identifica una brecha de conocimiento en torno a estudios que integren de forma sistemática los retos técnicos, normativos, económicos, sociales y ambientales de los proyectos de biomasa en Colombia, articulándolos explícitamente con herramientas y enfoques de gerencia de proyectos. La problemática central que aborda esta monografía se sintetiza en la existencia de múltiples barreras que dificultan la implementación de proyectos de generación de energía renovable a partir de biomasa en el país, las cuales deben analizarse de manera integral para formular alternativas de mejora.

Por otro lado, este trabajo buscó analizar los principales retos técnicos, normativos, económicos, sociales y ambientales que enfrentan los proyectos de generación de energía a partir de biomasa en Colombia mediante una revisión bibliográfica especializada, con miras a identificar oportunidades de mejora para su implementación. Para esto, se adoptó un enfoque cualitativo, descriptivo y documental, basado en una revisión sistemática de literatura. Esta sistematización permitió identificar patrones, convergencias y vacíos en la evidencia disponible, así como extraer buenas prácticas y lecciones aprendidas transferibles al contexto nacional.

Los resultados muestran que los proyectos de bioenergía en Colombia comparten barreras recurrentes con otras renovables, tales como marcos regulatorios complejos, instrumentos financieros insuficientes, debilidades de gobernanza, conflictos socioambientales y carencias en la planificación de la cadena de suministro de biomasa (Rocha et al., 2022; Fatima et al., 2021). No obstante, el análisis también permite identificar oportunidades y estrategias, entre ellas: el uso de metodologías multicriterio para la evaluación integral de proyectos, la adopción de esquemas de garantías y financiamiento verde, el fortalecimiento de la participación comunitaria y la co-creación de soluciones, y la incorporación de enfoques de ciclo de vida y sostenibilidad en la gestión de proyectos energéticos (Moreno et al., 2022; Shi et al., 2016; Calderon-Téllez et al., 2024).

El estudio concluye que la biomasa puede consolidarse como un componente clave de la transición energética colombiana siempre que se aborden de manera coordinada los retos identificados y se apliquen estrategias de gerencia de proyectos orientadas a la sostenibilidad y al contexto territorial del país.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

En la actualidad, la mayoría de los países del mundo se encuentra en un proceso de transición energética que busca principalmente migrar de un uso de fuentes de combustibles fósiles a la generación de energía con un uso mayoritario de fuentes de energías renovables como la energía solar, eólica, entre otras (Zahid et al., 2025).

De acuerdo con los datos reportados por la red global REN 21, para el año 2022 hubo un incremento del 5% en el consumo total de energía en el mundo respecto al año anterior, donde la principal fuente energética han sido los combustibles fósiles con una participación total del 79%, representado principalmente en carbón y petróleo, y donde el uso de fuentes de energía renovables ha pasado del 9,5% en 2012 a 12,9% en 2022 (REN 21, 2024).

Lo anterior representa un avance en el cambio de la matriz energética de los países por la diversificación en el uso de fuentes de energía renovables; no obstante, se sigue evidenciando la alta dependencia que tienen los países a las fuentes convencionales de energía, lo que conlleva los efectos adversos que dichas fuentes acarrear.

Una de las principales problemáticas asociadas al uso de combustibles fósiles para la generación de energía es el incremento de emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) a la atmósfera, lo que ha provocado elevación en la temperatura del planeta y alteración de las condiciones climáticas de todo el mundo. Para el año 1970, la emisión de CO₂ en el planeta se estimaba en 4693 megatoneladas, mientras que para el 2019 se situaba en 11771 megatoneladas (Prieto et al., 2025), lo que corresponde a un incremento del 150% y que genera una gran preocupación por la tendencia creciente de estas emisiones y sus efectos en el planeta.

Por su parte, Colombia también se encuentra en un proceso de transición debido, también entre otras causas, a la disminución de reservas de crudo y gas en el país que para el año 2023 han mostrado disminución con respecto al año anterior (Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, 2024), lo que hace además necesario el reemplazo de las fuentes fósiles no solo por las problemáticas anteriormente descritas, sino también por la necesidad de fuentes alternativas para garantizar la seguridad energética del país.

De esta manera, las fuentes de energía renovables se presentan como una alternativa a los crecientes problemas ambientales, sociales y políticos que ha conllevado el uso de fuentes fósiles para la generación de energía, dado que no generan emisiones de gases de efecto invernadero o cuyo balance de CO₂ es cero.

Dentro de las principales fuentes de energía renovables se encuentran la energía solar, eólica, geotérmica, biomasa, entre otras. Las tres primeras aprovechan las fuentes disponibles en el planeta como la luz del sol, el viento y el calor contenido al interior de la tierra, respectivamente. Por su parte, la biomasa corresponde a los residuos provenientes de diferentes fuentes, los cuales son ricos en carbono y que pueden ser transformados bajo diferentes tecnologías en calor, energía eléctrica y combustibles.

Si bien las energías renovables como la solar o eólica son ampliamente usadas a nivel mundial y en Colombia para la generación de energías limpias, estas requieren condiciones precisas para su aprovechamiento, puesto que dependen de las condiciones climáticas de la región donde se ubiquen los proyectos, lo que muestra desafíos al momento de su implementación. Por su parte, la biomasa presenta como una ventaja el no depender directamente de dichas condiciones y el tener mayor disponibilidad para su aprovechamiento (Cheng et al., 2025).

En el país se generan grandes cantidades de residuos agroindustriales, forestales, ganaderos y urbanos que, en la mayoría de los casos, terminan en rellenos sanitarios u otros sistemas de contención como tratamiento, lo que impacta la vida útil de estos. Esto produce también impactos negativos como la contaminación de suelos y fuentes hídricas, emisión de gases de efecto invernadero, cuando no son gestionados de forma adecuada, así como la pérdida de un recurso que podría ser aprovechado para generar energía.

A pesar de las bondades que presentan las energías renovables frente a los combustibles fósiles, existen retos por diferentes factores que dificultan la implementación de este tipo de proyectos en Colombia y en el mundo, por lo que se hace importante estudiar las problemáticas asociadas a su desarrollo que permitan establecer soluciones para su adecuada ejecución y de esta forma contribuyan a la mitigación de los impactos asociados al uso de fuentes convencionales.

Por lo anterior, se entiende como problemática de este estudio la existencia de barreras o retos a los que se enfrentan los proyectos de generación de energía renovable y principalmente los que se encuentran en una fuente como la biomasa, que abarcan aspectos técnicos, ambientales, económicos, sociales y normativos, que es importante abordar desde una visión integral de

gerencia de proyectos para el análisis y planteamiento de posibles alternativas que permitan una mejor implementación.

1.2 La pregunta de investigación

¿Cuáles son los principales retos que enfrentan los proyectos de generación de energía renovable a partir de biomasa en Colombia?

1.3 Los objetivos de investigación

1.3.1 Objetivo general

Establecer los principales retos técnicos, normativos, económicos, sociales y ambientales que enfrentan los proyectos de generación de energía renovable a partir de biomasa en Colombia mediante una revisión bibliográfica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir el estado actual de estudios relacionados con proyectos de generación de energía a partir de biomasa para la recopilación de los principales aspectos técnicos, normativos, económicos, sociales y ambientales, mediante revisión bibliográfica.
- Identificar los principales retos y limitaciones que enfrentan los proyectos de generación de energía a partir de biomasa a nivel global y nacional, a través del procesamiento de la información recopilada, con énfasis en el contexto nacional.
- Proponer alternativas y estrategias viables que contribuyan a superar los principales retos identificados y promuevan la implementación sostenible de proyectos de bioenergía en Colombia.

1.4 Justificación de la investigación

La transición energética en el país, como una apuesta de Colombia y en general del planeta para migrar de fuentes de energías contaminantes a unas más limpias, ha llevado a la implementación de una gran cantidad de proyectos de energía solar, eólica, entre otras, cada vez de mayores dimensiones, que han venido aportando con la paulatina descarbonización de sectores estratégicos como el energético, para aportar a las acciones que se están tomando contra el calentamiento global y el cambio climático.

Colombia cuenta con una matriz energética relativamente limpia para la generación de energía eléctrica, debido al uso de centrales hidroeléctricas para su generación; sin embargo, también se enfrenta a las consecuencias del cambio climático por temporadas de sequía que ponen en aprietos al sistema energético del país, al no contar con el recurso hídrico necesario para la generación de electricidad.

En este sentido, la biomasa representa una alternativa estratégica para la matriz energética del país, por su capacidad de generar energía a partir de residuos orgánicos, agrícolas, forestales e industriales, al tiempo que permite gestionar de manera más eficiente los desechos. A diferencia de otras fuentes intermitentes como la solar o la eólica, la bioenergía tiene la ventaja de ser gestionable, lo que significa que puede producir energía de forma continua. Sin embargo, su desarrollo en Colombia ha sido limitado por diversas barreras de tipo técnico, normativo, económico y social.

Por tanto, es necesario aportar a la generación de estudios que permitan identificar y comprender a profundidad los principales retos que enfrenta el mundo y el país en la implementación de proyectos de energía renovable a partir de biomasa. La falta de información consolidada, la debilidad de los incentivos económicos, las dificultades en el acceso a tecnología adecuada y la escasa articulación institucional son obstáculos que requieren ser abordados desde una visión integral. Este trabajo contribuirá a aportar análisis en esta materia al realizar una revisión bibliográfica amplia y sistemática sobre el tema, para identificar oportunidades de mejora y formular alternativas que favorezcan la implementación efectiva y sostenible de estos proyectos.

Además de ser un estudio necesario también para optar al título de especialista en gestión de proyectos, busca aportar a la línea de investigación de gerencia de proyectos de inversión privada, social y comunitaria de la Corporación Universitaria Minuto de Dios, por cuanto

contribuirá al conocimiento en esta materia, desde un análisis de diferentes aspectos esenciales en la gestión de este tipo de proyectos de inversión y la búsqueda de soluciones.

Por todo lo anterior, este proyecto se justifica en la medida en que busca aportar al conocimiento, la planificación y la acción en torno a una fuente de energía con alto potencial, pero con un desarrollo aún incipiente. Identificar retos y proponer caminos posibles es esencial para cerrar la brecha entre el potencial teórico de la biomasa y su aprovechamiento real en el territorio colombiano.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Marco de Antecedentes

Saavedra et al. (2021) realizaron una revisión narrativa de alcance global basada en la consulta de literatura académica, reportes técnicos y bases de datos internacionales especializadas en energías renovables. Su metodología consistió en analizar y comparar estudios recientes sobre generación eléctrica a partir de fuentes renovables, incluyendo solar, eólica, hidráulica y bioenergética, con el fin de identificar tendencias, avances tecnológicos y brechas persistentes. Aunque no se plantea como una revisión sistemática formal, los autores consolidan información proveniente de más de 50 documentos técnicos y científicos, lo que les permite caracterizar el estado actual del sector y las oportunidades para la descarbonización. Entre los hallazgos más relevantes se destaca el incremento acelerado en la capacidad instalada de tecnologías solares y eólicas, junto con el papel estratégico de la biomasa como fuente gestionable en países con importante producción agrícola. El estudio también resalta desafíos como la variabilidad en la disponibilidad del recurso, altos costos de inversión inicial, insuficiencias en infraestructura y marcos regulatorios, lo cual es especialmente pertinente para el contexto colombiano donde la biomasa presenta un alto potencial aún poco aprovechado.

Por su parte, Adhikari et al. (2024) desarrollaron una revisión sistemática siguiendo protocolos PRISMA, recopilando estudios publicados entre 2012 y 2023 para analizar el estado de las tecnologías de energías renovables en Nepal. El proceso metodológico incluyó la búsqueda estructurada en bases de datos como *Scopus*, *Web of Science* y *Google Scholar*, obteniéndose inicialmente más de 180 registros, de los cuales solo 40 artículos cumplieron los criterios de inclusión establecidos (relevancia temática, rigor metodológico y disponibilidad de información empírica). La revisión permitió identificar barreras críticas para la implementación de proyectos renovables: limitaciones técnicas asociadas a la intermitencia y calidad del suministro, altos costos de capital, falta de políticas e incentivos estables, y dificultades para la gestión comunitaria de los proyectos en zonas rurales. Asimismo, los autores destacan que la integración de tecnologías renovables en Nepal requiere fortalecimiento institucional, planificación territorial y formación local, elementos extrapolables a países latinoamericanos. Los resultados son particularmente relevantes para proyectos de biomasa, pues evidencian la necesidad de cadenas de suministro robustas, sistemas de apoyo financiero y participación social para garantizar sostenibilidad a largo plazo.

Otro estudio sobre revisión de literatura que abordó la integración de energía verde y economía circular empleó una metodología de análisis documental comparativo, basada en la identificación, selección y síntesis de estudios científicos recientes publicados principalmente entre 2015 y 2022. El proceso incluyó la clasificación temática de más de 100 artículos provenientes de bases de datos como *ScienceDirect* y *SpringerLink*, centrados en energías renovables, análisis de ciclo de vida (ACV), sostenibilidad industrial y estrategias circulares. El estudio organiza la evidencia en tres ejes: (1) la transición hacia energías limpias y su vínculo con la innovación tecnológica; (2) la necesidad de integrar principios de economía circular para optimizar recursos y reducir impactos ambientales; y (3) la articulación entre políticas públicas, cadenas de suministro sostenibles y modelos productivos limpios. Entre los hallazgos más destacados se encuentra que la biomasa y los residuos orgánicos poseen un papel clave en ecosistemas circulares al permitir la valorización energética de subproductos agroindustriales, promover la reducción de desechos y generar sinergias ambientales y económicas (Kumar et al., 2023). La revisión concluye que los proyectos de energía renovable son más eficientes y sostenibles cuando incorporan ACV, estrategias de reutilización de materiales y sistemas de gobernanza colaborativa, aspectos fundamentales para el diseño de proyectos de bioenergía en Colombia.

2.2. Marco Teórico

2.2.1 Biomasa

Se conoce como biomasa al conjunto de materiales orgánicos heterogéneos que, debido a su naturaleza y composición, cuentan con contenidos ricos en sustancias susceptibles de utilizarse para la generación de energía. Entre esta categoría se cuenta los residuos agroindustriales, la materia orgánica proveniente de las aguas residuales, lodos de depuradora, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, desechos animales, entre otros (Romero Salvador, 2010).

Además de su amplia disponibilidad, la biomasa destaca por su versatilidad y potencial para transformarse en diversas formas de energía, como biogás, bioetanol, biodiésel o energía térmica y eléctrica mediante procesos termoquímicos y bioquímicos.

2.2.2 Procesos para el aprovechamiento de biomasa

Entre los procesos termoquímicos más comunes se encuentran la combustión, que implica la oxidación completa de la biomasa para liberar calor utilizado en la producción de vapor y generación eléctrica; la gasificación, que consiste en la oxidación parcial en un ambiente controlado para producir gases combustibles ricos en hidrógeno y monóxido de carbono, los cuales pueden alimentar motores de combustión interna o turbinas; y la pirólisis, que descompone la biomasa en ausencia de oxígeno generando carbón vegetal, líquidos y gases para usos energéticos (Pérez et al., 2012; Quintero & Quintero, 2015)

Por otro lado, los procesos bioquímicos incluyen la digestión anaerobia, que convierte la biomasa en biogás mediante la acción de microorganismos, y la fermentación para producir biocombustibles líquidos. La selección del proceso depende de la composición y humedad de la biomasa, así como de la escala y tipo de energía requerida, siendo la gasificación acoplada a motores de combustión interna especialmente eficiente para potencias menores a 5 MWe (Quintero & Quintero, 2015).

2.2.3 Energía

La energía se define como la capacidad de un sistema para realizar trabajo o producir cambios físicos y químicos, manifestándose en diversas formas como energía cinética, potencial, térmica, química y eléctrica, las cuales pueden transformarse entre sí sin perder su cantidad total, conforme al principio de conservación de la energía (Bustamante García et al., 2016).

Esta definición es fundamental para entender los procesos de conversión energética en sistemas como los basados en biomasa, donde la energía química almacenada en la materia orgánica se transforma en energía térmica, eléctrica o biocombustibles mediante diferentes tecnologías.

2.3. Marco normativo

En Colombia, el marco legal para proyectos de generación de energía a partir de biomasa está fundamentado principalmente en la Ley 1715 de 2014, que promueve la integración de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) a la matriz energética nacional. Esta ley establece que la biomasa es una fuente prioritaria para diversificar la generación eléctrica y

reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, reconociendo su utilidad pública y conveniencia nacional. Además, la Ley 1715 promueve incentivos económicos, fiscales y regulatorios para facilitar el desarrollo de proyectos de energías renovables, incluyendo la biomasa, y establece la obligación de los comercializadores de energía de incorporar un porcentaje mínimo de energía proveniente de FNCER en sus contratos (Congreso de Colombia, 2014)

Complementariamente, el Decreto 1073 de 2015 y sus adiciones, como el Decreto 005 de 2025, reglamentan aspectos técnicos y administrativos relacionados con la generación distribuida y la autogeneración a partir de fuentes renovables, incluyendo la biomasa. Este marco normativo facilita la conexión de pequeñas y medianas plantas de generación a la red eléctrica, promoviendo la participación de usuarios en la generación propia y la venta de excedentes. Además, establece mecanismos para el acceso a subsidios y beneficios tarifarios, especialmente para comunidades y sectores vulnerables, fortaleciendo la inclusión social y la sostenibilidad energética (República de Colombia, 2015).

En materia ambiental, el Decreto 0852 de 2024, expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, modifica el régimen de licenciamiento ambiental para proyectos de energías renovables no convencionales, incluyendo la biomasa. Este decreto centraliza la competencia para otorgar licencias ambientales en la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) para proyectos con capacidad instalada menor a 50 MW, con el fin de agilizar los trámites y fortalecer la supervisión técnica. Asimismo, reconoce que, aunque las FNCER son energías alternativas con bajo impacto contaminante, pueden generar impactos ambientales que deben ser gestionados mediante evaluaciones rigurosas y planes de manejo ambiental, garantizando la sostenibilidad de los proyectos (República de Colombia, 2024).

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque y alcance de la investigación

Para este estudio se planteó un enfoque de investigación cualitativo descriptivo de tipo documental, por cuanto se basó en el análisis de información secundaria, para identificar y comprender los retos asociados al desarrollo de proyectos de aprovechamiento de biomasa desde varias dimensiones. No se buscó la medición o cuantificación de fenómenos mediante análisis estadísticos, sino llevar a cabo la interpretación y proposición de soluciones a partir del análisis sistematizado de la información.

Para asegurar la solidez metodológica, el presente estudio empleó una revisión de literatura desarrollada bajo un enfoque cuidadosamente estructurado, que permitió documentar de manera clara cada fase del proceso, desde la identificación de fuentes relevantes y su selección con criterios explícitos, hasta la evaluación crítica del contenido y la integración coherente de los hallazgos en el marco analítico de la investigación. En la tabla 1 se resumen las etapas de esta metodología consideradas en el presente estudio:

Tabla 1. Etapas planeadas para la revisión de literatura

Etapas	Descripción
1. Formulación de la pregunta de investigación	Se define una pregunta clara
2. Estrategia de búsqueda	Se establecen bases de datos, palabras clave, operadores booleanos y límites temporales.
3. Identificación de estudios	Se ejecutan las búsquedas y se registran los resultados.
4. Selección (Screening)	Se eliminan duplicados y se revisan títulos/resúmenes para aplicar los criterios de inclusión y exclusión.
5. Evaluación de elegibilidad	Se revisan los textos completos de los estudios preseleccionados.
6. Inclusión	Se determinan los estudios que formarán parte del análisis final.
7. Extracción de datos	Se recopila información relevante (autor, año, país, objetivos, métodos, hallazgos, limitaciones).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Definición de la población

Para este estudio la población se entendió como el universo de documentos, publicaciones científicas, informes técnicos, políticas públicas, normativas y demás estudios que se relacionen

con proyectos de generación de energía a partir de biomasa y que contengan información técnica, normativa, económica, social y ambiental relevante para analizar los retos y oportunidades en el desarrollo de este tipo de proyectos en el país.

3.2.2. Cálculo y selección de la muestra

La muestra se seleccionó de manera no probabilística, mediante muestreo por criterios como relevancia temática, actualidad, confiabilidad de las fuentes. Se propusieron como criterios de inclusión los siguientes:

- Documentos académicos y técnicos (artículos científicos, tesis, informes de organismos internacionales o gubernamentales, normas y leyes) que aborden explícitamente proyectos de generación de energía a partir de biomasa.
- Estudios publicados en los últimos 10 años (2015–2025) para asegurar actualidad y pertinencia.
- Publicaciones en inglés para ampliar el acceso a información relevante.
- Estudios con enfoque nacional (Colombia) o internacional, siempre que los hallazgos sean transferibles o comparables al contexto colombiano.

Se excluirán por su parte:

- Documentos sin revisión por pares o sin respaldo institucional reconocido.
- Publicaciones anteriores a 2015, excepto aquellas consideradas fundamentales como antecedentes teóricos.
- Fuentes con información redundante ya incluida en otras seleccionadas.
- Documentos cuyo contenido no aporte datos relevantes para el análisis de retos técnicos, normativos, económicos, sociales o ambientales.

Para garantizar la diversidad temática necesaria en el análisis cualitativo, se propuso revisar al menos 30 documentos relevantes. Este número mínimo buscó cubrir las cinco dimensiones de interés (técnica, normativa, económica, social y ambiental) y garantizar la inclusión de distintas perspectivas (nacional e internacional).

3.3. Instrumento

Para el análisis de la información documental, se propuso como instrumento una matriz de análisis documental, diseñada con base en los objetivos de la investigación (tabla 2). Esta matriz permitió organizar y clasificar los contenidos relevantes de las fuentes bibliográficas revisadas, considerando aspectos técnicos, normativos, económicos, sociales y ambientales de los proyectos de bioenergía a partir de biomasa. De igual manera, el instrumento fue ajustado de acuerdo con las indicaciones dadas por la docente del curso de Investigación II, sirviendo como validación de este.

Su aplicación facilitó la sistematización de los hallazgos para la identificación de retos comunes y la posterior formulación de estrategias adaptadas al contexto colombiano.

Tabla 2. Matriz de análisis documental propuesta para la recolección de datos en el estudio

Nº	Título	Autor y Año	Tipo de documento	País / Región	Dimensión abordada (Técnica, Normativa, Económica, Social, Ambiental)	Principales retos / hallazgos identificados	Relevancia para Colombia	Observaciones adicionales

Fuente: elaboración propia

3.4. Descripción de procedimientos

Para la recolección de información documental se empleó una estrategia de búsqueda sistemática en el buscador de base de datos académico *Scopus*. La búsqueda se realizó mediante el uso de palabras clave definidas de acuerdo con los objetivos de la investigación (por ejemplo: "biomasa", "energía renovable", "retos", "Colombia", "bioenergía", "política energética", entre otras), con operadores booleanos para optimizar resultados.

Se estableció una ventana temporal de los últimos 10 años como criterio principal de actualidad, salvo fuentes consideradas fundamentales como antecedentes teóricos. Los resultados obtenidos se depurarán aplicando los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. La información relevante se organizará en la matriz de análisis documental diseñada para sistematizar hallazgos según las dimensiones técnica, normativa, económica, social y ambiental.

3.5. Consideraciones éticas

3.5.1. Análisis de consideraciones éticas

En el desarrollo de esta investigación se aplicaron las consideraciones éticas establecidas por la Corporación Universitaria Minuto de Dios (Uniminuto) (2021) en su *“Política de ética e integridad científica de la I+D+i+C”*, en concordancia con los principios universales de la investigación responsable, la integridad académica y el respeto por las fuentes de información, tal como lo promueven organismos internacionales como la Declaración de Helsinki, el Código de Ética del Consejo Nacional de Bioética y las normas de buenas prácticas de investigación científica.

Dado que el estudio corresponde a una investigación documental de tipo cualitativo, basada en la revisión sistemática de literatura y análisis de información secundaria, no involucra participación directa de personas ni experimentación con seres humanos o animales, por lo que no implica riesgos físicos, psicológicos o sociales. No obstante, se garantiza el cumplimiento del respeto por la propiedad intelectual, dado que todos los documentos, artículos, leyes y fuentes consultadas fueron citados y referenciadas siguiendo las Normas APA (7ª edición), asegurando el reconocimiento del trabajo de los autores originales y evitando cualquier forma de plagio.

Se mantiene la veracidad y fidelidad de la información recolectada, sin manipulación de resultados, omisión de datos o tergiversación de hallazgos. La información se analizó de manera objetiva, respetando los límites de los datos disponibles. Los resultados de esta revisión se presentan con el propósito de contribuir al conocimiento y la mejora de la gestión de proyectos energéticos sostenibles en el contexto colombiano, sin generar perjuicio alguno a instituciones, comunidades o actores involucrados en el sector energético.

De igual manera, toda la información utilizada proviene de fuentes públicas y académicas (bases de datos científicas, informes institucionales, documentos gubernamentales). En ningún caso se divulgará información confidencial o de carácter privado.

4. RESULTADOS

4.1. Estudios científicos identificados en la temática

Con la pregunta de investigación y los objetivos planteados se definió la estrategia de búsqueda partiendo de la elección de *Scopus*, como el motor de búsqueda para la revisión bibliográfica teniendo en cuenta el gran número de bases de datos con las que cuenta, además de una interfaz que permite la fácil inclusión y exclusión de parámetros. Se establecieron además palabras clave, operadores booleanos y límites temporales, los cuales se condensan en la siguiente ecuación de búsqueda o “*query*”:

TITLE-ABS-KEY (("biomass" OR "bioenergy" OR "biofuel" OR "renewable energy" OR "sustainable energy") AND ("energy project" OR "renewable project*" OR "bioenergy project*" OR "biomass project*") AND ("implementation" OR "execution" OR "development" OR "management") AND ("challenge*" OR "barrier*" OR "obstacle*" OR "limitation*" OR "risk*" OR "difficulty" OR "constraint*") AND ("Colombia" OR "Latin America" OR "developing countr*")) AND PUBYEAR > 2014 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "English"))*

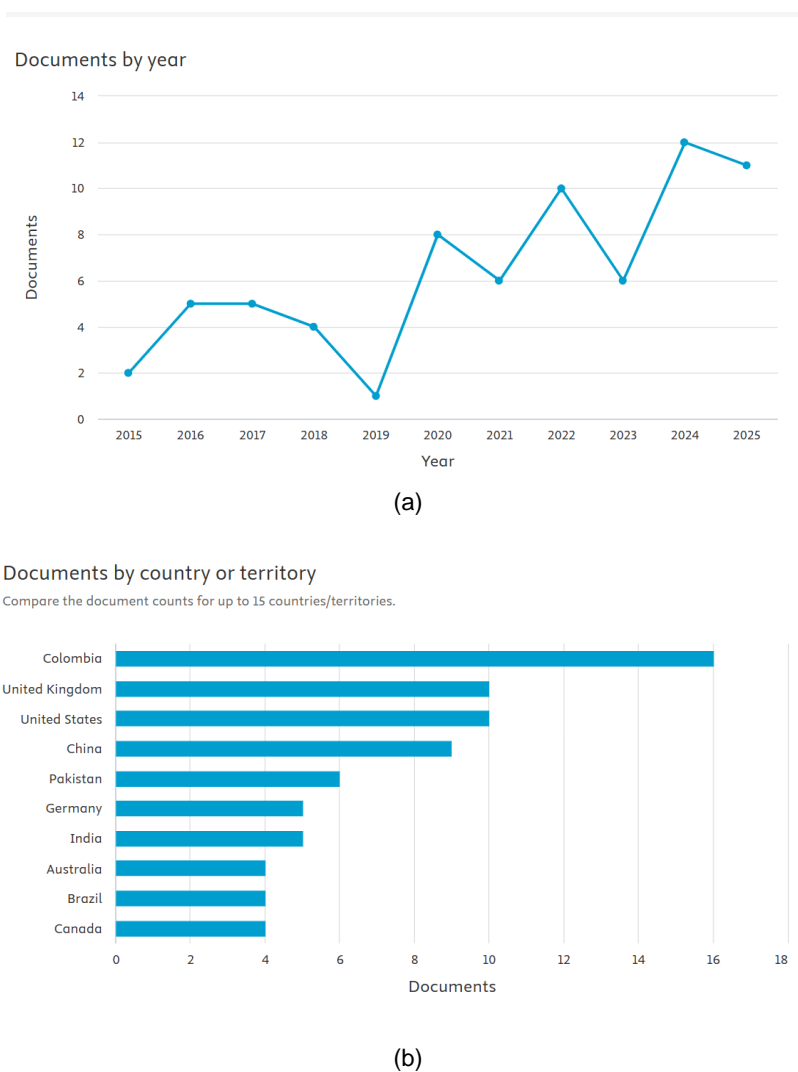
De esta manera, se buscó contar con una primera selección de documentos enfocada a resolver la pregunta de investigación, arrojando como primer resultado 70 publicaciones que cumplieron las condiciones establecidas en el *query*. Se procedió a la depuración de las 70 publicaciones revisando inicialmente los documentos cuya tipología era indeterminada o no eran publicaciones con revisiones por pares, aplicando este último filtro directamente en *Scopus*, se obtuvo un resultado de 57 publicaciones, quienes fueron los artículos que se revisaron para evaluar su elegibilidad, según fueron o no los más relevantes para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos del trabajo.

Con base en lo anterior, se revisó cada uno de los documentos con el fin de evaluar su elegibilidad, excluyendo aquellos documentos que fueran demasiado técnicos, o solamente se centraran en una particularidad de algún tipo de fuente de energía renovable, sin incluir la visión de implementación de este tipo de proyectos y las principales consideraciones que se debieran tener en cuenta para su ejecución. De esta manera, se incluyeron para la revisión planteada en este trabajo, un total de 30 artículos los cuales fueron sistematizados en la matriz de instrumento.

Por otro lado, con el fin de establecer el estado actual de los estudios relacionados con proyectos de generación de energía que abordan las dimensiones técnica, normativa, económica, social y ambiental, se consolidó la información de los 30 documentos seleccionados tras la aplicación de la metodología indicada anteriormente. A partir de esta muestra, se elaboraron representaciones gráficas que permiten analizar la evolución temporal de las publicaciones y su distribución geográfica.

La figura 1 presenta el número de publicaciones incluidas en la revisión por año (a) y por país (b). En la figura 1a se observa una tendencia creciente en la producción científica sobre retos y barreras en proyectos de energía renovable y bioenergía a partir de biomasa durante el periodo 2015–2025.

Figura 1. Número de publicaciones conforme a los criterios de búsqueda por (a) año y (b) país



Fuente: Scopus (2025)

Los primeros años del periodo analizado concentran un menor número de estudios, mientras que a partir de 2018 se evidencia un incremento sostenido en la cantidad de artículos, lo que refleja un interés cada vez mayor de la comunidad académica y de los organismos internacionales por comprender los desafíos asociados a la transición energética y al aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía.

Por su parte, la figura 1b muestra la distribución de las publicaciones por país de origen. Los resultados indican que una proporción importante de los estudios procede de contextos latinoamericanos y, en particular, de Colombia, lo que resulta coherente con la inclusión explícita de este país en la ecuación de búsqueda utilizada. Esta concentración de estudios colombianos permite contar con evidencia directamente aplicable al contexto nacional, mientras que los trabajos de otros países en desarrollo aportan referencias comparativas valiosas para comprender cómo se manifiestan retos similares en diferentes realidades territoriales y regulatorias.

Por otra parte, con el propósito de garantizar una visión integral de los retos asociados a los proyectos de bioenergía, los 30 documentos seleccionados fueron clasificados de acuerdo con las dimensiones abordadas en cada uno: económica, técnica, social, ambiental y normativa. La tabla 3 sintetiza la frecuencia con la que cada dimensión aparece en los estudios analizados.

Tabla 3. Frecuencia de la dimensión estudiada en los documentos seleccionados

Dimensión	Frecuencia
Económica	29
Técnica	24
Social	18
Ambiental	17
Normativa	16

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con esto, la dimensión económica es la de mayor presencia, con 29 publicaciones que incluyen análisis de costos de inversión, estructuras de financiamiento, viabilidad económica y riesgos financieros. Esto evidencia que una preocupación central en la literatura es la rentabilidad de los proyectos, la disponibilidad de instrumentos financieros adecuados y las barreras económicas que limitan su implementación, especialmente en contextos rurales o de alta vulnerabilidad.

4.2. Principales retos identificados

Los retos y limitaciones asociados al desarrollo de proyectos de energía renovable, especialmente a partir de biomasa, se sistematizaron mediante el instrumento de análisis documental descrita en la metodología (tabla 2), cuyos resultados se presentan de manera consolidada en la tabla 4, donde se resumen los hallazgos más relevantes de cada uno de los 30 estudios incluidos.

En términos técnicos, varios estudios destacan la necesidad de contar con metodologías robustas para evaluar tanto la viabilidad de los proyectos como los riesgos asociados a la producción de biomasa. Por su parte en la dimensión económica, los estudios señalan de manera reiterada los altos costos de inversión inicial, la dificultad de acceso a financiamiento y la percepción de alto riesgo por parte de inversionistas y entidades financieras. Shi et al. (2016) identifican, a partir de 18 instrumentos de apoyo, que los mecanismos más efectivos para viabilizar proyectos renovables aislados incluyen la participación local en la operación y mantenimiento, garantías de préstamo, subsidios iniciales, microcréditos al usuario final y financiación concesional.

En cuanto a la dimensión social, Robles-Algarín et al. (2018) evidencian que la selección inadecuada de criterios de evaluación conduce a proyectos estandarizados que no se ajustan a las necesidades y expectativas locales, generando insatisfacción y baja aceptación comunitaria. Mediante juicio de expertos, el estudio identifica subcriterios clave como la aceptación de la comunidad, los recursos locales y la generación de empleo local, que resultan esenciales para la priorización de proyectos en contextos rurales.

En la dimensión normativa e institucional, varios trabajos resaltan la existencia de brechas entre el potencial de las fuentes renovables y su participación real en la matriz energética, atribuyendo esta situación a marcos regulatorios poco claros, trámites complejos y limitada coordinación interinstitucional. Moreno et al. (2022) muestran, para el caso de la energía solar en Colombia, cómo la Ley 1715 de 2014 fue un impulsor clave del crecimiento de proyectos, pero también evidencian que persisten barreras que frenan el aprovechamiento pleno del potencial disponible en esta y otras fuentes de energía renovables.

Tabla 4. Principales retos identificados en la literatura consultada para proyectos energéticos de fuentes renovables

No.	Autor y año	Principales retos / hallazgos identificados	Relevancia para Colombia	Observaciones adicionales
1	(de Oliveira et al., 2015)	Necesidad de metodologías robustas para evaluar viabilidad financiera y riesgo; asegurar que el cultivo de palma se realice en tierras degradadas y no cause deforestación. Desarrollo de una metodología con Criterios e Indicadores de sostenibilidad y modelo de simulación en RETScreen. La cogeneración con biomasa de palma es financieramente viable (TIR 29%-30.4%, payback 4.5 años) y reduce emisiones de GEI vs. combustibles fósiles.	Alta. La palma de aceite es un cultivo relevante en Colombia. La metodología de evaluación de sostenibilidad y viabilidad financiera es directamente aplicable para proyectos en zonas como la Orinoquía o el Chocó. Los hallazgos sobre los riesgos socioambientales de la monocultura son una advertencia crucial.	Incluye un estudio de caso detallado. Señala el conflicto entre la palma y los cultivos tradicionales, y la importancia de proteger a las comunidades y pequeños agricultores.
2	(Robles-Algarín et al., 2018)	Selección inadecuada de criterios para evaluar proyectos, leading to standardized projects que no se adaptan al contexto local y generan insatisfacción. Mediante juicio de expertos, se identificaron 20 subcriterios clave agrupados en 5 dimensiones. Los criterios más relevantes fueron "Aceptación de la comunidad", "Recursos locales (agua y suelo)" y "Generación de empleos locales".	Muy Alta. El estudio es específico para el contexto rural colombiano. Proporciona una herramienta concreta y validada para la planificación energética integral, priorizando criterios sociales y ambientales junto a los técnico-económicos.	Ofrece una lista priorizada de criterios lista para ser usada por planificadores y tomadores de decisiones. La dimensión de "Riesgo" incluye factores como el conflicto armado y la inestabilidad política.
3	(Ghimire et al., 2024)	Altas percepciones de riesgo en APPs, especialmente financieros y de mercado. Diferencias en la percepción de riesgos entre sectores público y privado. Los riesgos financieros y de mercado son los más críticos (56.2% privado, 32.6% público). Los 3 principales sub-riesgos son: riesgo de ingresos (venta de energía/fertilizantes), riesgo operacional (cadena de suministro) y costo de inversión privada. Los proyectos basados en residuos municipales son percibidos como más riesgosos que los agroindustriales.	Media-Alta. Aunque el contexto es diferente, los tipos de riesgos identificados (financieros, de cadena de suministro, normativos) son muy similares a los que enfrentarían proyectos de biomasa en Colombia. Ofrece lecciones valiosas para estructurar APPs y políticas de mitigación de riesgos. También dada la similitud en composición de residuos orgánicos y el interés en PPP para proyectos de biomasa.	Utiliza la metodología AHP (Proceso Analítico Jerárquico). Las recomendaciones de política para mitigar riesgos de ingresos y cadena de suministro son aplicables. Metodología AHP aplicable a Colombia para priorización de riesgos.
4	(Shi et al., 2016)	Financiación de proyectos renovables aislados debido a altos costos iniciales, baja capacidad de pago y altos costos de transacción. Evaluación de 18 instrumentos de apoyo. Los 5 más efectivos son: 1) Participación local en O&M, 2) Garantías de préstamo, 3) Subsidios iniciales (start-up grant), 4) Financiación al usuario final (microcréditos), y 5) Financiación concesional.	Alta. Los resultados son directamente relevantes para la electrificación de Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia usando biomasa u otras renovables. Los instrumentos mejor evaluados son una guía clara para el diseño de políticas públicas.	El marco de evaluación se basa en Factibilidad, Sostenibilidad y Replicabilidad. Destaca que la participación local y las garantías son más efectivas que instrumentos como los Feed-in Tariffs en sistemas aislados.

5	(Moreno, Milanes, et al., 2022)	Brecha entre el alto potencial solar y la capacidad instalada real. Dependencia de la hidroelectricidad y vulnerabilidad ante fenómenos climáticos. Crecimiento significativo de proyectos solares desde 2014, con 209 proyectos activos en 2020 y una potencia planeada de 7,036 MW. Los departamentos de La Guajira, Atlántico, Cesar y Santander concentran >50% de la capacidad. La Ley 1715 de 2014 (incentivos tributarios) fue un impulsor clave.	Alta para el contexto general de FNCER. Aunque se enfoca en solar, ilustra perfectamente los desafíos normativos, de planificación y de implementación que también enfrenta la biomasa. Muestra el éxito de los incentivos normativos y el potencial de departamentos específicos.	Proporciona un diagnóstico cuantitativo actualizado del estado de una FNCER en Colombia. Refuerza la importancia de un marco normativo estable y de incentivos.
6	(Pacagnell a Junior et al., 2025)	Proyectos de biomasa y hidroeléctricos son menos eficientes. Proyectos de metano y biogas de rellenos sanitarios son más eficientes. México y Colombia destacan por políticas favorables.	Muy alta, especialmente para evaluar eficiencia de proyectos de biomasa en el contexto latinoamericano.	Análisis DEA (Análisis Envolvente de Datos) útil para evaluar eficiencia de proyectos en Colombia.
7	(Moreno, Ospino-Castro, et al., 2022)	Criterios económicos y ambientales son los más relevantes. La fracción renovable es el subcriterio más importante. Energía solar es la alternativa mejor valorada.	Alta. Directamente aplicable a zonas no interconectadas de Colombia.	Metodología FAHP (Proceso de jerarquía analítica difusa) puede adaptarse para evaluar proyectos de biomasa.
8	(Matthäus & Mehling, 2020)	Mecanismos de garantía reducen costos de financiamiento. - Ahorros potenciales de hasta US\$1.5 billones a 2030. Riesgo de incumplimiento de contratos es una barrera clave.	Alta. para diseñar instrumentos de garantía que atraigan inversión en biomasa.	Propuesta de mecanismo multilateral aplicable en Colombia con apoyo de bancos de desarrollo.
9	(Silva, 2025)	Falta de claridad y transparencia en consultas previas. Conflictos territoriales y culturales con comunidades indígenas. Percepción de las consultas como formalidades sin impacto real. Asimetrías de poder y falta de voluntad política.	Alta. Colombia es uno de los casos analizados. Se destacan conflictos en La Guajira y el caso Quimbo.	Incluye recomendaciones para fortalecer marcos normativos y diálogo intercultural.
10	(Villada Duque et al., 2017)	Incentivos fiscales (Ley 1715 de 2014) reducen el LCOE entre 12% y 20%. Limitaciones para pequeños proyectos. Se proponen mecanismos complementarios: períodos de gracia y tasas de descuento subsidiadas.	Muy alta. Estudio específico sobre incentivos en Colombia.	Propone mecanismos para hacer viables proyectos de biomasa forestal y creación de empleo.
11	(Villegas et al., 2024)	Autonomía energética limitada en zonas rurales. Riesgo político como principal barrera. Potencial solar y eólico subutilizado. Falta de dimensionamiento adecuado de sistemas.	Alta. Enfocado en comunidades rurales no interconectadas del Caribe colombiano.	Propone flujos de trabajo para proyectos de electrificación con energías renovables.

12	(Chavarry Galvez & Revinova, 2025)	Transición energética lenta por barreras financieras, tecnológicas y climáticas. Brasil, Chile y Colombia lideran en energías renovables. Se requieren marcos institucionales más sólidos y cooperación internacional.	Media. Colombia es mencionado como uno de los países con mayor potencial y avance normativo.	Incluye propuestas de políticas públicas y fortalecimiento de bancos nacionales.
13	(Guerrero-Martin et al., 2024)	Alteración del suelo, pérdida de cobertura vegetal, impacto visual, fragmentación de ecosistemas, afectación a la fauna. Aumento de población flotante, conflictos por uso de la tierra, oportunidades de empleo y capacitación. Generación de empleo local, incremento en ingresos familiares, oferta de bienes y servicios.	Alta. El estudio se desarrolla en La Guajira, región con alto potencial para energías renovables, pero con vulnerabilidades socioambientales.	Metodología: Matriz de evaluación de impactos ambientales (Fernández-Vitora et al., 1997). Incluye fases de construcción, operación y desmantelamiento.
14	(Akram & Jamil, 2025)	Potencial de recurso, eficiencia en producción, nivel tecnológico requerido. Costos de inversión, costo de ciclo de vida, incentivos financieros. Uso de suelo, impacto ambiental, mitigación de emisiones. Aceptación pública, generación de empleo sostenible. Necesidad de políticas que aborden conflictos de uso de suelo e incentiven renovables.	Media-Alta. Aunque el contexto es iraní, el enfoque metodológico y los criterios de evaluación son aplicables a Colombia, especialmente en regiones con alta diversidad socioambiental.	Propone un modelo novedoso de evaluación multicriterio bajo incertidumbre. Incluye análisis de sensibilidad y comparación con otros métodos.
15	(Hosseini Dehshiri et al., 2024)	Presenta un marco MCDM híbrido (BWM + IVPF-WASPAS) para priorizar tecnologías renovables según criterios técnicos y de sostenibilidad; concluye que en el caso de Irán la energía solar es la más adecuada; resalta la necesidad de incentivos/políticas y de consideración integrada de factores económicos y ambientales.	Media. Metodología transferible para evaluar tecnologías renovables (incl. biomasa) en Colombia; útil para priorizar proyectos locales según criterios técnicos y de sostenibilidad; ofrece plantilla metodológica para estudios comparativos.	No se centra en biomasa específicamente (comparación de múltiples fuentes). Resultados dependen de criterios y ponderaciones locales. Habría que adaptar factores (p. ej. disponibilidad de residuos agroindustriales en Colombia).
16	(Calderon-Tellez et al., 2024)	Introduce el marco ISMP (Innovation, Sustainability, Management of Projects) con extensión del ciclo de vida (fase ecosystems impact). Usa System Dynamics para conectar decisiones estratégicas y evaluar la viabilidad de sostenibilidad de intervenciones; muestra que el enfoque sistémico mejora la planificación/anticipación de impactos y la toma de decisiones sobre intervenciones.	Alta. Aplica directamente a proyectos renovables en Colombia (contiene caso colombiano y financiamiento local); proporciona herramienta de apoyo a decisiones para evaluar impactos ambientales y sociales a largo plazo. Útil para diseño de proyectos de biomasa con evaluación de ciclo de vida y escenarios.	Enfocado en metodología de gestión y modelado (no es un estudio empírico exhaustivo de biomasa). Útil para incorporar modelado dinámico en evaluaciones de proyectos colombianos y para integrar stakeholders.
17	(Rocha et al., 2022)	Documenta la evolución de proyectos presentados a UPME (2007–2022), describe distribución por fuente y potencia, identifica retos: barreras regulatorias, necesidad de respaldo	Alta. Análisis específico de Colombia con datos y marco regulatorio; identifica claramente obstáculos (ZNI, incentivos, capacidades locales) y oportunidades (incentivos fiscales, híbridos, FENOGE, potencia en solar/offshore)	Incluye cifras de capacidad (ej.: participación de biomasa baja en los proyectos registrados), discusión sobre incentivos fiscales y políticas (Ley 1715, Ley 2099), y recomendaciones para soluciones

		político/incentivos, limitaciones técnicas en ZNI (zonas no interconectadas), brechas sociales (comunidades indígenas/afro), dependencia hidroeléctrica y vulnerabilidad por ENSO. Destaca Ley 1715/2014 y actualizaciones (p. ej. Ley 2099 de 2021) como factores claves.	wind). Muy pertinente para proyectos de biomasa en cuanto a regulación, incentivos y dimensionamiento.	híbridas en ZNI. Recomendable como fuente base para contexto normativo y social colombiano.
18	(Fatima et al., 2021)	Identifica 10 factores críticos para el desarrollo de renovables: recursos, demanda, adaptación, políticas, entorno de inversión, gobernanza, aceptación pública, etc. Las principales barreras son: falta de buena gobernanza, débil adaptación tecnológica y políticas poco eficientes. Los impulsores clave: aceptación pública y entorno de inversión.	Alta. Los factores identificados son similares a los desafíos de Colombia, especialmente: gobernanza, incentivos, aceptación comunitaria y fortalecimiento institucional. Útil para analizar barreras transversales a la biomasa.	Aunque no es específico de biomasa, sus resultados son extrapolables a renovables en países en desarrollo, incluidos proyectos rurales en Colombia.
19	(Donastorg et al., 2022)	Identifica barreras financieras severas: falta de reconocimiento de activos renovables, ausencia de préstamos especializados, alto riesgo percibido, falta de garantías financieras, implementación parcial de políticas (Ley 57-07). Concluye que no existe un mercado financiero maduro para proyectos renovables.	Alta. Muy relevante para Colombia, donde los proyectos de biomasa enfrentan retos similares: falta de instrumentos financieros, riesgo tecnológico percibido, déficit de garantías y escasa bancarización de proyectos renovables.	Aporta insumos clave para comparar mecanismos financieros en el Caribe con los de Colombia y resalta la necesidad de fortalecer herramientas como créditos verdes, garantías y PPAs.
20	(Benavides-Castillo et al., 2021)	Propone el marco CARED para co-diseño de soluciones energéticas con comunidades. Identifica barreras sociales y culturales: falta de confianza, diferencias de cosmovisión, prejuicios, comunicación limitada, problemas de participación. Destaca la necesidad de diálogo intercultural, ética del diseño y procesos colaborativos.	Muy Alta. Muy relevante para proyectos de biomasa en Zonas No Interconectadas (ZNI), donde la participación comunitaria es clave. Aplica directamente a contextos rurales e indígenas de Colombia.	Útil para la dimensión social: muestra cómo la aceptación y co-creación mejoran la sostenibilidad y viabilidad de proyectos energéticos rurales.
21	(Mohamma di, 2023))	El estudio desarrolla un marco institucional para explicar cómo los instrumentos de política (FiTs, net metering, proyectos piloto) y los intermediarios permiten la aparición de modelos de energía comunitaria. En países en desarrollo hay barreras institucionales, debilidad regulatoria, políticas top-down, baja participación y necesidad de intermediarios para superar vacíos institucionales.	Alta. Para Colombia, resalta la importancia de intermediarios locales, participación comunitaria y marcos regulatorios específicos para proyectos energéticos distribuidos, incluyendo biomasa. Ayuda a entender modelos participativos y cómo normas e incentivos influyen en proyectos comunitarios rurales.	Aunque no estudia biomasa directamente, sus hallazgos aplican a energía descentralizada y comunitaria en zonas rurales del país. Útil para la dimensión social e institucional

22	(Martínez-Ruiz et al., 2025)	El estudio analiza el LCOE bajo incertidumbre, mostrando que la variabilidad de irradiación afecta el riesgo financiero. Los municipios del norte del país (Cesar, Atlántico) ofrecen menores costos y menor riesgo; Villavicencio y Neiva los más altos. El trabajo integra VaR y CVaR (99%) para evaluar escenarios extremos. Confirma que Colombia tiene variaciones moderadas debido a su clima tropical.	Media. Muestra cómo evaluar financieramente proyectos renovables considerando incertidumbre, muy aplicable a biomasa para análisis de sensibilidad, riesgos y regionalización. Además, evidencia la relevancia de incentivos tributarios colombianos incluidos en el modelo.	Aunque se centra en energía solar, la metodología de riesgo financiero puede transferirse al análisis de biomasa (LCOE, VaR, CVaR, volatilidad del recurso). Útil para la dimensión técnica y económica.
23	(Probst et al., 2021)	Falta de adicionalidad: Mecanismos como el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) a menudo subsidian proyectos que se habrían realizado de todos modos. Alto riesgo percibido: Entorno regulatorio opaco, riesgo de impago de la utility (off-taker risk) y riesgos políticos elevan el costo de capital. Falta de coordinación: Expansión de la generación sin una planificación integral con la transmisión y la demanda puede llevar a sobreoferta y crisis financiera del operador de red. Los esquemas combinados que abordan tanto el riesgo como el retorno (GET FIT) son más efectivos para movilizar capital privado. La reducción de riesgos se traduce principalmente en un menor costo de la equity (patrimonio), no tanto de la deuda. Los cortes de energía afectan significativamente la productividad de las empresas manufactureras.	Alta Relevancia. Colombia enfrenta desafíos similares para atraer inversión privada a proyectos de energías renovables, incluida la biomasa. Las lecciones sobre el diseño de instrumentos financieros y de política son directamente aplicables.	Diseñar esquemas de apoyo (subastas, pagos por capacidad) que no solo aumenten el ingreso, sino que también mitiguen riesgos regulatorios y de contraparte. Establecer metodologías transparentes para evaluar la adicionalidad financiera de los proyectos apoyados con recursos públicos, evitando subsidiar proyectos que son viables por sí mismos. Fortalecer la coordinación entre la UPME, el operador de red (XM) y las distribuidoras para asegurar que la nueva generación, incluida la biomasa, sea absorbible por el sistema.
24	(Kursun et al., 2015)	Evaluación ambiental incompleta: El ACV tradicional no captura completamente el "trabajo" de la naturaleza (servicios ecosistémicos). Uso intensivo de recursos: Sistemas de biogás y gasificación pueden tener altos requisitos de tierra y agua en su ciclo de vida, aunque a menudo usan subproductos (rastros, estiércol). Baja eficiencia financiera: La conversión de biogás en electricidad es financieramente menos atractiva que su uso directo para cocción. La combinación de ACV y análisis de emergencia proporciona una evaluación de sostenibilidad	Muy Alta. Ofrece un marco metodológico robusto y hallazgos directos para evaluar proyectos de biomasa y biogás en el contexto rural y agroindustrial colombiano, considerando la sostenibilidad integral.	Aplicar el marco ACV + Emergencia para evaluar proyectos de biomasa, cuantificando no solo las emisiones, sino también la presión sobre los recursos naturales. Priorizar el uso directo del biogás para cocción o calor de proceso en agroindustrias, en lugar de solo generar electricidad, para maximizar la eficiencia energética y económica. Los proyectos deben diseñarse considerando las prácticas culturales y la disponibilidad local de biomasa (residuos agroindustriales,

		más holística. El biogás mostró el mejor desempeño ambiental (alta renovabilidad, bajo GWP) cuando se opera de manera óptima. La opción más sostenible fue una combinación del 70% de cocción con biogás y 30% con cocinas mejoradas de biomasa, respetando las prácticas tradicionales.		estiércol) para asegurar su adopción y sostenibilidad.
25	(Ángel-Sanint et al., 2023)	Sobreestimación del potencial: Los estudios que solo consideran el recurso técnico ignoran las múltiples restricciones que hacen inviable un proyecto en la práctica. Conflictos socioambientales: La ubicación de proyectos puede chocar con áreas de alto valor ecosistémico, territorios étnicos y comunidades locales. Falta de herramientas de planificación: No existía una herramienta integral que integrara la viabilidad financiera y la gestión ambiental para la ubicación de proyectos. Desarrollaron una metodología GIS con evaluación multicriterio (MCDA) que integra restricciones, criticidades ambientales y LCOE. Crearon mapas de idoneidad que clasifican las zonas según su rentabilidad y la facilidad de gestión ambiental. Identificaron que los proyectos eólicos y solares en etapas avanzadas coincidían con las zonas de mayor idoneidad identificadas por su modelo.	Muy Alta. Proporciona una metodología probada en el contexto colombiano que puede y debe ser adaptada específicamente para evaluar el potencial y los retos de la ubicación de proyectos de biomasa.	Adaptar la metodología para mapear el potencial de biomasa residual agroindustrial, incorporando criterios específicos como: disponibilidad y logística de residuos, competencia con otros usos (alimentación, forraje), y impactos locales (olores, emisiones). Utilizar esta herramienta para la planificación territorial, identificando "Zonas de Interés para Bioenergía" que minimicen conflictos y maximicen la viabilidad técnico-económica-ambiental. La herramienta es valiosa para tomadores de decisión, inversionistas y comunidades, facilitando el diálogo con información transparente.
26	(Jena & Chaturvedi, 2025)	Falta de acceso a financiamiento y alto costo del capital. Mercados financieros domésticos pequeños y limitada capacidad institucional. Proyectos de pequeño tamaño que no atraen inversores privados. Volatilidad cambiaria y riesgos políticos.	Alta. Colombia comparte desafíos como la limitada capacidad de financiamiento local, la necesidad de atraer capital privado internacional y la presencia de riesgos normativos y cambiarios. Las soluciones financieras propuestas son altamente adaptables.	Propone un menú de soluciones financieras innovadoras (fondos de inversión, garantías parciales de crédito, mecanismos de cobertura de riesgo cambiario) que pueden ser modelo para instrumentos en Colombia.
27	(Fleta-Asín & Muñoz, 2024)	La asignación de riesgos al sector privado atrae más inversión. Los esquemas de APP con negociación directa, apoyo gubernamental y propuestas no solicitadas aumentan la inversión privada. La estabilidad económica e institucional del país es un driver clave.	Muy Alta. El estudio proporciona evidencia empírica sólida sobre cómo estructurar Asociaciones Público-Privadas (APP) para proyectos de energía renovable, crucial para el contexto colombiano.	Identifica efectos de sustitución y complementariedad: transferir riesgos al privado es más efectivo cuando no hay apoyo estatal directo, destacando la necesidad de un diseño contractual inteligente.

28	(Shimbar & Ebrahimi, 2017)	Los métodos de valoración tradicionales (VPN) subestiman proyectos riesgosos. El método DNPV desacopla y valúa los riesgos específicos (valor calorífico, riesgo político) de forma explícita. El riesgo político es el factor más crítico para la IED.	Alta. Colombia enfrenta desafíos similares para atraer IED en proyectos de biomasa/WtE. La metodología DNPV ofrece una herramienta robusta para una valoración más precisa, incorporando riesgos locales.	Demuestra cómo una valoración adecuada puede convertir un proyecto "inviabile" en "atractivo". Es especialmente relevante para evaluar el potencial de la biomasa residual en Colombia.
29	(Chand Malav et al., 2020)	Alto contenido orgánico y humedad (~50 %) → bajo PCI (800–1000 kcal/kg); segregación insuficiente; limitada infraestructura; solo ~20 % de MSW tratado. Emisiones de CH ₄ de vertederos; contaminación por vertido abierto. Baja separación en la fuente; resistencia pública a incineración/WtE. Altos CAPEX/OPEX; costes de recolección altos. Dificultad para implementar reglas y falta de datos fiables.	Alta. Composición de residuos similar a muchas ciudades colombianas (alta fracción orgánica): favorece tecnologías biológicas (biometanización) y soluciones modulares en lugar de incineración masiva. - Refuerza la necesidad de mejorar separación en la fuente y caracterización de residuos en Colombia. - Indica que WtE debe complementar reciclaje, no sustituirlo.	Recomienda estudios de caracterización municipales, análisis LCA y evaluación económico-financiera por escala. Advierte sobre riesgo de desplazar recicladores informales si no se diseña la política socialmente.
30	(Bhandary et al., 2022)	Acceso a financiamiento: China ofrece paquetes financieros+EPC que son atractivos por disponibilidad y rapidez, no necesariamente por concesionalidad. Condicionamientos regulatorios: la presencia de políticas claras (FITs, acuerdos G2G) fue clave para atraer inversión; mercados desregulados reducen interés chino. Barreras institucionales: limitada capacidad técnica local y trámites complejos que frenan proyectos; escasa transferencia tecnológica bajo modelos EPC. Riesgo y retorno: China entra en mercados riesgosos, pero exige garantías/retornos; financiación no siempre más barata que MDBs. .	Alta. Financiamiento y condicionantes: Colombia también depende de financiamiento externo para proyectos renovables/biomasa; debe diseñar incentivos claros (tarifas/ofertas) para atraer inversión condicionada. • Capacidades locales: refuerza la necesidad de fortalecer capacidades técnicas/regulatorias municipales para gestionar fondos y contratos. • Riesgos de modelo EPC: evaluar cláusulas que limiten transferencia tecnológica y participación local en proyectos de biomasa.	Explica por qué fallan o prosperan proyectos más por política/finanzas que por técnica. Recomendable combinar con estudios técnicos (p. ej. caracterización de residuos/biomasa) para diseñar propuestas completas.

Fuente: elaboración propia a partir de las referencias bibliográficas consultadas.

4.3. Alternativas y estrategias identificadas para superar los retos

A partir del instrumento aplicado con los 30 artículos seleccionados, se identificaron no solo los principales retos técnicos, económicos, sociales, ambientales y normativos, sino también un conjunto de alternativas y estrategias propuestas por los autores para superarlos. Estas estrategias se agruparon en la tabla 5 por dimensión de análisis y por el tipo de actor involucrado (estado, sector privado, comunidades y equipos de gerencia de proyectos), con el fin de facilitar su aplicación al contexto colombiano.

Tabla 5. Síntesis de estrategias para abordar los retos identificados en proyectos energéticos de fuentes renovables

Dimensión del reto	Principales retos identificados (síntesis)	Alternativas y estrategias propuestas en la literatura	Actores clave
Técnica	Falta de metodologías integrales para evaluar viabilidad de proyectos de biomasa; incertidumbre en rendimiento de tecnologías; limitaciones en cadena de suministro de biomasa.	Uso de modelos de simulación y herramientas como RETScreen para evaluar escenarios técnicos y de eficiencia (de Oliveira et al., 2015). Implementación de metodologías multicriterio para seleccionar tecnologías según disponibilidad de recursos locales y condiciones del sitio. Desarrollo de protocolos estandarizados para caracterización de biomasa y diseño de plantas piloto antes de escalar a proyectos comerciales.	Equipos de gerencia de proyectos, consultores técnicos, universidades y centros de investigación.
Económica	Altos costos de inversión inicial, dificultades de acceso a crédito, percepción de alto riesgo financiero, especialmente en zonas no interconectadas.	Diseño de instrumentos financieros específicos: garantías de préstamo, subsidios iniciales (start-up grants), microcréditos al usuario final y financiación concesional (Shi et al., 2016). Estructuración de proyectos bajo esquemas de asociaciones público-privadas (APP) con reparto de riesgos entre Estado y sector privado (Ghimire et al., 2024). Aprovechamiento de incentivos tributarios existentes para FNCER (Ley 1715 y actualizaciones) y creación de líneas de crédito verdes orientadas a bioenergía.	Gobierno nacional y local, banca de desarrollo, bancos comerciales, inversionistas privados y desarrolladores de proyectos.
Social	Baja aceptación de las comunidades, falta de información y desconfianza frente a proyectos energéticos; debilidad en la generación de beneficios locales.	Incorporar criterios sociales como aceptación comunitaria, empleo local y uso de recursos locales en la evaluación de proyectos (Robles-Algarín et al., 2018). Diseñar planes de gestión social que incluyan consultas tempranas, mesas de diálogo y mecanismos de participación vinculante. Establecer modelos de negocio comunitarios (cooperativas energéticas, participación accionaria local) que garanticen beneficios directos a la población.	Comunidades, líderes locales, ONG, empresas desarrolladoras, entidades públicas territoriales.
Ambiental	Riesgos de deforestación, cambios de uso del suelo, impactos sobre recursos hídricos y biodiversidad; falta de evaluación integral del ciclo de vida.	Uso de criterios e indicadores de sostenibilidad para asegurar que la biomasa provenga de residuos o de áreas degradadas y no de deforestación (de Oliveira et al., 2015). Aplicación de enfoques de análisis de ciclo de vida y evaluación de impactos acumulativos, como propone el marco ISMP (Calderon-Téllez et al., 2024). Integración de planes de manejo ambiental robustos y monitoreo participativo con comunidades y autoridades ambientales.	ANLA y autoridades ambientales regionales, desarrolladores de proyectos, consultores ambientales, comunidades.

Normativa y de gobernanza	Trámites complejos, vacíos regulatorios, cambios frecuentes en reglas de juego; poca coordinación entre entidades; baja participación de la biomasa en los mecanismos de incentivos.	Simplificación y armonización de procedimientos de licenciamiento y conexión a red para proyectos de biomasa. Ajustar los programas de incentivos (tributarios, tarifarios y de financiación) para incluir explícitamente la bioenergía y no solo tecnologías más consolidadas como solar o eólica (Rocha et al., 2022; Moreno et al., 2022). Crear instancias de coordinación interinstitucional entre los sectores de energía, agricultura y ambiente para la planificación de proyectos.	Gobierno nacional (Ministerios, UPME, ANLA), autoridades departamentales y municipales, gremios del sector energético y agroindustrial.
Gestión de proyectos	Proyectos diseñados sin enfoque sistémico; débil gestión de riesgos y de stakeholders; selección inadecuada de criterios de priorización.	Adopción de marcos de gestión de proyectos sostenibles, como el ISMP (Innovation, Sustainability, Management of Projects), que integran dimensiones sociales, ambientales y económicas en todo el ciclo de vida (Calderon-Téllez et al., 2024). Aplicación de metodologías de análisis de riesgos (AHP, mapas de riesgos, matrices de probabilidad-impacto) específicas para proyectos de bioenergía (Ghimire et al., 2024). Uso de herramientas multicriterio para priorizar proyectos considerando simultáneamente criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales (Robles-Algarín et al., 2018; Fatima et al., 2021).	Equipos de gerencia de proyectos, oficinas de planeación, consultores, entidades financiadoras.

Fuente: elaboración propia a partir de las referencias bibliográficas consultadas.

Desde la perspectiva de gerencia de proyectos, las estrategias identificadas pueden organizarse de acuerdo con las fases del ciclo de vida típico de un proyecto (formulación, financiación, ejecución y operación) y se presentan en la tabla 6, permitiendo visualizar en qué momento del proyecto es más pertinente aplicar cada alternativa para favorecer su implementación sostenible en Colombia.

Tabla 6. Estrategias priorizadas para proyectos de bioenergía en Colombia según fase del ciclo de proyecto

Fase del ciclo de proyecto	Principales retos identificados	Estrategias priorizadas a partir de la revisión	Dimensión predominante
Formulación y preinversión	Información incompleta sobre disponibilidad de biomasa; análisis técnico-económicos parciales; poca incorporación de criterios sociales y ambientales.	Aplicar metodologías de evaluación integral (RETSscreen, análisis de ciclo de vida, marcos ISMP). Utilizar matrices multicriterio que incluyan criterios sociales (aceptación comunitaria, empleo local) y ambientales, además de los económico-técnicos. Realizar diagnósticos participativos sobre disponibilidad de residuos y percepción de las comunidades antes de definir la localización del proyecto.	Técnica, económica, social, ambiental
Estructuración y financiación	Dificultad para cerrar la estructura financiera por percepción de alto riesgo y ausencia de instrumentos específicos para bioenergía.	Diseñar paquetes de apoyo que combinen garantías de crédito, subsidios a la inversión y financiación concesional, especialmente en Zonas No Interconectadas. Estructurar proyectos bajo esquemas APP que permitan compartir riesgos entre sector público y privado. Articular el proyecto con programas e incentivos existentes para FNCER (Ley 1715, Ley 2099 y normas reglamentarias).	Económica, normativa

Gestión de permisos y licenciamiento	Trámites prolongados y complejos; cambios normativos que generan incertidumbre; falta de lineamientos específicos para biomasa.	Implementar ventanillas únicas o rutas claras para proyectos de FNCER con lineamientos específicos para biomasa. Aprovechar la centralización de licencias en ANLA para proyectos renovables menores a 50 MW (Decreto 0852 de 2024), armonizando requisitos técnicos con características de la biomasa. Elaborar guías técnicas para apoyo a desarrolladores en el cumplimiento de requisitos ambientales y energéticos.	Normativa, ambiental
Ejecución (construcción y puesta en marcha)	Problemas en la logística de suministro de biomasa, limitaciones en capacidades locales y conflictos sociales por percepción de impactos.	Establecer acuerdos formales de suministro con productores agroindustriales, asociaciones campesinas y entes territoriales, con cláusulas de sostenibilidad del recurso. Implementar programas de capacitación técnica para mano de obra local en operación y mantenimiento de plantas de biomasa. Desarrollar planes de gestión social que incluyan mecanismos de atención de quejas y espacios permanentes de diálogo con la comunidad.	Técnica, social
Operación y mejora continua	Riesgos de sostenibilidad económica a largo plazo, variabilidad en la oferta de biomasa, falta de monitoreo de impactos socioambientales.	Establecer sistemas de monitoreo y evaluación continua de indicadores económicos, sociales y ambientales definidos desde la formulación del proyecto. Ajustar periódicamente los contratos de suministro de biomasa y los planes de negocio para responder a cambios en el mercado y en la disponibilidad de residuos. Incorporar mecanismos de revisión participativa de los resultados con las comunidades y autoridades para fortalecer la licencia social del proyecto.	Económica, social, ambiental

Fuente: elaboración propia

De esta manera, los resultados de la revisión documental permiten mostrar que las alternativas y estrategias viables para promover la implementación sostenible de proyectos de bioenergía en Colombia no se limitan a un solo tipo de acción, sino que requieren la combinación de herramientas de evaluación integral (RETSscreen, AHP, ISMP) que apoyen la toma de decisiones en todas las fases del proyecto, de instrumentos financieros y de política pública que reduzcan la percepción de riesgo y faciliten el acceso al financiamiento, especialmente en contextos rurales y ZNI.

De igual manera, de estrategias de gestión social y ambiental, que aseguren el origen sostenible de la biomasa y la generación de beneficios tangibles para las comunidades, así como enfoques de gerencia de proyectos sostenibles, que integren transversalmente las dimensiones técnica, económica, social, ambiental y normativa a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Estos hallazgos se presentan como insumos concretos para que los gestores de proyectos de bioenergía en Colombia puedan diseñar iniciativas mejor estructuradas, con menores riesgos y mayor probabilidad de éxito en el marco de la transición energética del país.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que los proyectos de generación de energía a partir de biomasa comparten con otras fuentes renovables (solar, eólica, hidroeléctrica) una serie de retos estructurales de carácter técnico, económico, social, ambiental y normativo. Esta coincidencia es consistente con lo reportado por diferentes autores que, aunque analizan principalmente otras FNCER, describen barreras muy similares a las identificadas en esta revisión.

Por ejemplo, Moreno et al. (2022) evidencian para la energía solar en Colombia una brecha significativa entre el alto potencial técnico y la capacidad instalada real, atribuida a desafíos de planificación, dependencia histórica de la hidroelectricidad, vulnerabilidad a fenómenos climáticos y restricciones institucionales, a pesar del crecimiento de proyectos solares y de los incentivos de la Ley colombiana 1715 de 2014. Esta situación es análoga a la de la biomasa: existe un importante potencial en residuos agroindustriales y urbanos, pero su aprovechamiento efectivo se ve limitado por barreras en financiamiento, información, articulación institucional y aceptación social.

Del mismo modo, Pacagnella Junior et al. (2025) muestran que, en un análisis de eficiencia técnica y económica mediante DEA, los proyectos de biomasa e hidroeléctricos resultan menos eficientes que proyectos de metano y biogás de rellenos sanitarios, aun en países con políticas favorables como México y Colombia. Este hallazgo refuerza la idea de que la biomasa enfrenta desventajas competitivas adicionales frente a otras FNCER, lo que hace aún más relevante el diseño de estrategias específicas que mejoren su eficiencia y reduzcan sus riesgos.

En la dimensión técnica, los resultados de la revisión destacan la necesidad de metodologías robustas para evaluar viabilidad y riesgo en proyectos de biomasa, así como la falta de protocolos estandarizados para la caracterización de la biomasa y el diseño de plantas. De Oliveira et al. (2015) abordan esta brecha mediante una combinación de criterios e indicadores de sostenibilidad y simulaciones con RETScreen, mostrando que la cogeneración con biomasa de palma puede ser técnica y financieramente viable, siempre que el abastecimiento se realice en tierras degradadas y se eviten impactos como la deforestación.

Estos resultados se articulan con lo planteado por Puente (2017), quien identifica que el diseño de plantas de biomasa requiere un tratamiento detallado de parámetros de ciclo de potencia, eficiencia y condiciones de operación, y por González (2013), que evidencia que la falta de estandarización en protocolos de caracterización de biomasa puede incrementar en 18–25 % los

costos de preinversión en plantas experimentales, debido a la necesidad de repetir mediciones y ajustar diseños.

Más allá de la biomasa, Rocha-Meneses et al. (2023), en un análisis de 12 casos en América Latina, muestran que el 72 % de los proyectos de energía renovable presentan debilidades en coordinación interinstitucional, particularmente entre los sectores de agricultura y energía. Este hallazgo coincide con la problemática identificada en esta investigación, donde la falta de articulación entre entidades y la ausencia de lineamientos específicos para biomasa dificultan traducir el potencial técnico en proyectos concretos.

Por tanto, la evidencia sugiere que los retos técnicos no pueden verse de manera aislada. En este sentido, las estrategias propuestas en los resultados de la tabla 6 (protocolos de caracterización, herramientas de evaluación integral y mejora de la coordinación entre sectores) son consistentes con las recomendaciones de estos autores y se presentan como elementos críticos para pasar del potencial teórico a la viabilidad real de proyectos de bioenergía.

Por otro lado, la dimensión económica es la más abordada en los estudios revisados, y los resultados de esta investigación confirman que los altos costos de inversión inicial, la percepción de riesgo y la dificultad de acceso a financiamiento constituyen barreras centrales para la bioenergía. Shi et al. (2016) identifican, a partir del análisis de 18 instrumentos de apoyo, que las garantías de préstamo, los subsidios iniciales, la financiación concesional y los esquemas que involucran a usuarios locales en operación y mantenimiento son cruciales para viabilizar proyectos renovables en sistemas aislados. Matthäus y Mehling (2020) complementan esta visión al demostrar que los mecanismos de garantía pueden reducir de manera significativa los costos de financiamiento, estimando ahorros potenciales de hasta 1,5 billones de dólares a 2030, y señalando que el riesgo de incumplimiento contractual es una barrera clave para la movilización de capital.

Jena y Chaturvedi (2025) profundizan en el caso de países en desarrollo y documentan que los proyectos renovables de pequeño tamaño, como muchos de biomasa y biogás, enfrentan mercados financieros domésticos pequeños, alta volatilidad cambiaria y limitada capacidad institucional, lo que desincentiva la participación de inversionistas privados. Proponen un menú de soluciones financieras innovadoras, entre ellas fondos de inversión especializados, garantías parciales de crédito y mecanismos de cobertura de riesgo cambiario.

En el contexto colombiano, Moreno et al. (2022) muestran que, para soluciones energéticas en zonas no interconectadas, los criterios económicos y ambientales son los más relevantes en la priorización de alternativas, y que la fracción renovable es el subcriterio más importante. La energía solar resulta mejor valorada, pero los autores destacan que la metodología FAHP empleada puede adaptarse para evaluar proyectos de biomasa, lo que refuerza la pertinencia de utilizar herramientas multicriterio para reducir la incertidumbre percibida por financiadores y tomadores de decisión.

Adicionalmente, Villada Duque et al. (2017) demuestran que los incentivos fiscales de la Ley 1715 de 2014 pueden reducir el LCOE de proyectos renovables entre 12 % y 20 %, aunque con limitaciones para proyectos de menor escala, lo que sugiere la necesidad de mecanismos complementarios como períodos de gracia y tasas de interés subsidiadas.

La convergencia entre estos estudios y los resultados de esta investigación refuerza la idea de que las estrategias financieras planteadas en la tabla 6 (garantías de crédito, subsidios iniciales, financiación concesional, adaptación de incentivos fiscales, diseño de APP y fondos especializados) no solo son coherentes con las necesidades de los proyectos de biomasa, sino que se alinean con la evidencia internacional sobre cómo reducir el riesgo y atraer inversión hacia las FNCER.

Por su parte, en la dimensión social, los resultados de la revisión de literatura evidencian que la aceptación comunitaria, la percepción de beneficios locales y la calidad de los procesos participativos son factores determinantes para la viabilidad de los proyectos de bioenergía. Esto se observa con claridad en estudios centrados en otras FNCER, pero que resultan plenamente extrapolables a la biomasa. Silva (2025) analiza conflictos asociados a proyectos de energía renovable en territorios indígenas y rurales, incluyendo casos en Colombia como La Guajira y el proyecto hidroeléctrico El Quimbo. Identifica que la falta de claridad y transparencia en las consultas previas, las asimetrías de poder y la percepción de que estos procesos son meras formalidades sin impacto real, generan desconfianza y resistencia comunitaria.

También, Robles-Algarín et al. (2018), en un estudio específico para el contexto rural colombiano, muestran que la selección inadecuada de criterios de evaluación conduce a proyectos estandarizados que no se adaptan al territorio, generando insatisfacción. Mediante juicio de expertos, identifican 20 subcriterios clave, entre los que destacan la aceptación de la comunidad, el uso de recursos locales (agua y suelo) y la generación de empleo local.

Los resultados de esta investigación, que destacan la importancia de incorporar criterios sociales en la evaluación de proyectos y de diseñar modelos de negocio inclusivos, son coherentes con estos hallazgos. Además, refuerzan la idea de que las estrategias propuestas en la tabla 6 (diagnósticos participativos, mesas de diálogo, esquemas de participación accionaria, cooperativas energéticas y modelos de beneficio compartido) no son simplemente “buenas prácticas”, sino condiciones necesarias para reducir conflictos y fortalecer la licencia social de los proyectos de bioenergía.

Por otro lado, desde el punto de vista de la gerencia de proyectos, la literatura consultada coincide en que la gestión de riesgos y el diseño de esquemas de Asociaciones Público-Privadas (APP) adecuados son elementos decisivos para viabilizar proyectos de FNCER, incluida la bioenergía. Ghimire et al. (2024) enfatizan que los proyectos renovables en países en desarrollo enfrentan una combinación de riesgos técnicos, financieros, regulatorios y de aceptación social que no pueden ser asumidos completamente por un solo actor. Proponen el uso de metodologías de análisis de riesgos y herramientas multicriterio para asignar y mitigar estos riesgos de forma explícita, integrándolos en la toma de decisiones.

Fleta-Asín y Muñoz (2024), en un análisis sobre APP en proyectos de energía renovable, encuentran que la asignación de riesgos al sector privado, combinada con apoyo gubernamental y estabilidad institucional, aumenta la inversión, pero subrayan que la transferencia de riesgos debe diseñarse de manera inteligente para evitar efectos indeseados. Su evidencia respalda las estrategias planteadas en esta investigación, en las que se propone estructurar proyectos de bioenergía bajo esquemas de APP que compartan riesgos y utilicen garantías públicas para atraer capital privado, especialmente en contextos rurales y Zonas No Interconectadas.

Por todo lo anterior, al contrastar los resultados de esta investigación con la literatura disponible, se observa una alta coherencia entre los retos identificados en los proyectos de bioenergía (técnicos, económicos, sociales, ambientales y normativos); las barreras documentadas para otras FNCER en Colombia y América Latina (brechas entre potencial y capacidad instalada, debilidades de coordinación, conflictos socioambientales, limitaciones financieras) y las estrategias propuestas por diversos autores (herramientas multicriterio, incentivos, garantías, APP, metodologías SIG, fortalecimiento de consultas y participación comunitaria), que se alinean con las recomendaciones planteadas en este trabajo para el caso colombiano.

6. CONCLUSIONES

La revisión de literatura desarrollada permitió describir con claridad el estado actual de los estudios sobre proyectos de generación de energía a partir de biomasa entre 2015 y 2025, evidenciando un crecimiento progresivo del conocimiento disponible y una base suficiente para analizar sus dimensiones técnicas, económicas, sociales, ambientales y normativas. Aunque la producción académica no se centra exclusivamente en biomasa, su abordaje dentro del marco más amplio de las energías renovables ofrece una perspectiva comparada útil para comprender su papel en la transición energética y en la gestión de proyectos sostenibles.

El análisis de esta literatura hizo posible identificar los principales retos y limitaciones que enfrenta la bioenergía en Colombia, destacándose las brechas en la caracterización de recursos, la variabilidad tecnológica, los altos costos iniciales, el riesgo percibido por inversionistas y las dificultades de acceso a financiamiento. A ello se suman desafíos sociales asociados a la participación comunitaria, la distribución equitativa de beneficios y la aceptación del proyecto, así como condicionantes ambientales relacionadas con la disponibilidad sostenible del recurso y los impactos sobre el uso del suelo. En el ámbito normativo persisten trámites complejos y una falta de lineamientos específicos que limitan el aprovechamiento del marco favorable de las FNCER.

A partir de estos hallazgos fue posible proponer alternativas y estrategias viables que contribuyan a superar tales limitaciones. Se destacan el fortalecimiento de metodologías de evaluación integral y análisis multicriterio, el diseño de instrumentos financieros que disminuyan el riesgo para inversores, la promoción de modelos de negocio inclusivos con participación de las comunidades y el ajuste de disposiciones regulatorias para mejorar la articulación institucional y simplificar procesos. Estas estrategias, vistas de manera conjunta, evidencian que el desarrollo de proyectos de bioenergía en Colombia requiere una gestión sistémica que integre sostenibilidad, gobernanza territorial y participación social. Bajo este enfoque, la biomasa puede consolidarse como un componente estratégico de la transición energética y del desarrollo territorial sostenible del país.

7. RECOMENDACIONES

Se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones en el ámbito abordado en este trabajo:

1. Fortalecer la revisión de bibliografía ampliando el número de bases de datos y metabuscadors como Google Académico, así como aumentar la cantidad de documentos revisados, con el fin de obtener mayores fuentes de información que robustezcan los resultados y discusión del tema abordado.
2. Desarrollar investigaciones que documenten en detalle experiencias concretas de proyectos de bioenergía (exitosos y fallidos), analizando su gestión de riesgos, arreglos de gobernanza, esquemas financieros y relaciones con las comunidades, para generar lecciones aprendidas directamente transferibles a la práctica.
3. Complementar las revisiones cualitativas con estudios que cuantifiquen impactos (ambientales, económicos, sociales) de diferentes configuraciones de proyectos de biomasa y comparen su desempeño con otras FNCER.
4. Explorar el uso de inteligencia artificial, optimización y modelos de simulación integrados con datos territoriales y socioeconómicos, que permitan a los gestores de proyectos evaluar escenarios de forma más precisa y transparente.
5. Investigar cómo la bioenergía puede integrarse en estrategias de desarrollo rural, reconversión productiva y conservación de ecosistemas, evitando conflictos por uso del suelo y contribuyendo a objetivos más amplios de equidad territorial y justicia ambiental.

REFERENCIAS

- Adhikari, D. R., Techato, K., & Jariyaboon, R. (2024). A systematic literature review on renewable energy technologies for energy sustainability in Nepal: Key challenges and opportunities. *International Journal of Renewable Energy Development*, 13(2), 206–222. <https://doi.org/10.61435/ijred.2024.60032>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH. (2024). *Informe de Reservas y Recursos - IRR 2023*. <https://www.anh.gov.co/es/noticias/informe-anual-de-reservas-y-recursos-irr-2023/>
- Akram, M., & Jamil, S. (2025). Evaluation of renewable energy projects aligned with sustainability goals using a dual spherical fuzzy rough number cloud-based decision-making approach. *Journal of Applied Mathematics and Computing*. <https://doi.org/10.1007/s12190-025-02611-z>
- Ángel-Sanint, E., García-Orrego, S., & Ortega, S. (2023). Refining wind and solar potential maps through spatial multicriteria assessment. Case study: Colombia. *Energy for Sustainable Development*, 73, 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.019>
- Benavides-Castillo, J. M., Carmona-Parra, J. A., Rojas, N., Stansfield, K. E., Colmenares-Quintero, J. C., & Colmenares-Quintero, R. F. (2021). Framework to design water-energy solutions based on community perceptions: Case study from a Caribbean coast community in Colombia. *Cogent Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1905232>
- Bhandary, R. R., Gallagher, K. S., Jaffe, A. M., Myslikova, Z., Zhang, F., Petrova, M., Barrionuevo, A., Fontaine, G., Fuentes, J. L., Karani, P., Martinez, D., Seithheko, L., Staicu, D., Ullah, N., & Yimere, A. (2022). Demanding development: The political economy of climate finance and overseas investments from China. *Energy Research and Social Science*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102816>
- Bustamante García, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruiz, J. A., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(38), 5–24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&nrm=iso
- Calderon-Tellez, J. A., Bell, G., Herrera, M. M., Lovell, K., & Sato, C. (2024). Exploring a Theoretical Framework and System Dynamics Model for Innovation and Sustainability within the Management of Projects Paradigm. *Engineering Project Organization Journal 2024*. *Engineering Project Organization Journal*, 11. <https://doi.org/10.25219/epoj.2024.006>
- Chand Malav, L., Yadav, K. K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G. K., Krishnan, S., Rezania, S., Kamyab, H., Pham, Q. B., Yadav, S., Bhattacharyya, S., Yadav, V. K., & Bach, Q. V. (2020). A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227>

- Chavarry Galvez, D. P., & Revinova, S. Y. (2025). Energy transition as a path to sustainable development in Latin American countries. *Unconventional Resources*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.uncred.2025.100157>
- Cheng, Y., Zhang, X., Qin, S., Li, J., Zhang, L., Zhang, Y., Du, N., Zhu, Z., Li, X., & Zhang, Y. (2025). Renewable resources from nature: biomass-derived carbon for composite materials in electrochemical energy storage devices. *Journal of Energy Storage*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114692>
- Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. In *Diario Oficial No. 49150, 13 de mayo de 2014*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- de Oliveira, R. C., Silva, R. D. de S., & Tostes, M. E. de L. (2015). Una metodología para el análisis de proyectos de cogeneración utilizando residuos de biomasa de palma de aceite como fuente de energía en la Amazonia. *DYNA (Colombia)*, 82(190), 105–112. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n190.43298>
- Donastorg, A. D., Renukappa, S., & Suresh, S. (2022). Financing renewable energy projects in the Dominican Republic: an empirical study. *International Journal of Energy Sector Management*, 16(1), 95–111. <https://doi.org/10.1108/IJESM-10-2020-0002>
- Fatima, N., Li, Y., Ahmad, M., Jabeen, G., & Li, X. (2021). Factors influencing renewable energy generation development: a way to environmental sustainability. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 51714–51732. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14256-z/Published>
- Fleta-Asín, J., & Muñoz, F. (2024). Risk allocation schemes between public and private sectors in green energy projects. *Journal of Environmental Management*, 357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120650>
- Ghimire, M., Pandey, S., & Woo, J. R. (2024). Assessing stakeholders' risk perception in public-private partnerships for waste-to-energy projects: A case study of Nepal. *Energy for Sustainable Development*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101414>
- Guerrero-Martin, L. E., Guerrero-Martin, C. A., & Camacho-Galindo, L. S. (2024). Environmental impact assessment of the installation, operation and dismantling of a photovoltaic park in the Colombian Guajira IV SEGIB-AECID Secondary Award in Research on Sustainable Development in Ibero-America. *Iberoamerican Journal of Development Studies*, 13(2), 226–253. https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.10716
- Hosseini Dehshiri, S. J., Amiri, M., Mostafaeipour, A., & Le, T. (2024). Evaluation of renewable energy projects based on sustainability goals using a hybrid pythagorean fuzzy-based decision approach. *Energy*, 297. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131272>

- Jena, L. P., & Chaturvedi, A. (2025). Renewable energy financing in the Pacific Island Countries. *Energy for Sustainable Development*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101642>
- Kumar, S., Darshna, A., & Ranjan, D. (2023). A review of literature on the integration of green energy and circular economy. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21091>
- Kursun, B., Bakshi, B. R., Mahata, M., & Martin, J. F. (2015). Life cycle and emergy based design of energy systems in developing countries: Centralized and localized options. *Ecological Modelling*, 305, 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.03.006>
- Martínez-Ruiz, Y., Micán, C. A., & Manotas-Duque, D. F. (2025). LCOE at Risk in Different Locations in Colombia. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 44, 73–90. <https://doi.org/10.54337/ijsepm.9745>
- Matthäus, D., & Mehling, M. (2020). De-risking Renewable Energy Investments in Developing Countries: A Multilateral Guarantee Mechanism. *Joule*, 4(12), 2627–2645. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.10.011>
- Mohammadi, N. (2023). Investigation of Community Energy Business Models from an Institutional Perspective: Intermediaries and Policy Instruments in Selected Cases of Developing and Developed Countries. *Sustainability (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/su15108423>
- Moreno, C., Milanés, C. B., Arguello, W., Fontalvo, A., & Alvarez, R. N. (2022). Challenges and perspectives of the use of photovoltaic solar energy in Colombia. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(5), 4521–4528. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp4521-4528>
- Moreno, C., Ospino-Castro, A., & Robles-Algarín, C. (2022). Decision-Making Support Framework for Electricity Supply in Non-Interconnected Rural Areas Based on FAHP. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(5), 79–87. <https://doi.org/10.32479/ijeep.12913>
- Pacagnella Junior, A. C., de Moraes, G. H. S. M., da Silva, A. L., Putti, F. F., & Bortoletto, W. W. (2025). Clean development mechanisms in Latin America: Efficiency analysis of energy-generating projects. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 44(5). <https://doi.org/10.1002/ep.70023>
- Pérez, J. F., Lenis, Y., Rojas, S., & León, C. (2012). Generación distribuida mediante gasificación de biomasa: un análisis técnico-económico e implicaciones por reducción de emisiones de CO₂. *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia*, 62, 157–169. <https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.redin.12476>
- Prieto, F., García-García, C. B., & Salmerón-Gómez, R. (2025). Modelling global fossil CO₂ emissions with a lognormal distribution. *Socio-Economic Planning Sciences*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102104>

- Probst, B., Westermann, L., Anadón, L. D., & Kontoleon, A. (2021). Leveraging private investment to expand renewable power generation: Evidence on financial additionality and productivity gains from Uganda. *World Development*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105347>
- Quintero, J., & Quintero, L. (2015). Biomasa: métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *I3+*, 2(2), 28–44. <https://doi.org/10.24267/23462329.109>
- REN 21. (2024). *Renewables 2024 Global Status Report Collection, Global Overview*. https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/global_overview
- República de Colombia. (2015). Decreto 1073 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía. In *Diario Oficial No. 49523*, 26 de mayo de 2015. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77887>
- República de Colombia. (2024). Decreto 852 de 2024. Por el cual se modifican los artículos 2.2.2.3.1.1, 2.2.2.3.2.2 y 2.2.2.3.2.3 del Decreto 1076 de 2015, en relación con las competencias para otorgar la licencia ambiental a los proyectos de exploración y uso de fuentes de energía alternativa virtualmente contaminantes y se toman otras determinaciones. In *Diario Oficial No. 52808*, el 5 de julio de 2024. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=246236>
- Robles-Algarín, C. A., Taborda-Giraldo, J. A., & Ospino-Castro, A. J. (2018). A procedure for criteria selection in the energy planning of Colombian rural areas. *Informacion Tecnologica*, 29(3), 71–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000300071>
- Rocha, C. M. M., Boiler, J. D. M., Pizarro, S. M. M., Higuera, L. M. M., & Conde, W. R. I. (2022). Evolution, Challenges, and Perspective in the Implementation of Projects with Renewable Energy Sources: Colombia Case. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(6), 230–236. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13460>
- Romero Salvador, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(2), 331–345. <https://rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Saavedra, A., Galvis, N. A., Mesa, F., Banguero, E., Castaneda, M., Zapata, S., & Aristizábal, A. J. (2021). Current state of the worldwide renewable energy generation: A review. *International Journal on Engineering Applications*, 9(3), 115–127. <https://doi.org/10.15866/irea.v9i3.19987>
- Shi, X., Liu, X., & Yao, L. (2016). Assessment of instruments in facilitating investment in off-grid renewable energy projects. *Energy Policy*, 95, 437–446. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.001>

- Shimbar, A., & Ebrahimi, S. B. (2017). The application of DNPV to unlock foreign direct investment in waste-to-energy in developing countries. *Energy*, 132, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.098>
- Silva, R. G. (2025). Prior Consultation Challenges in Latin American Renewable Energy Projects: A Comparative Analysis of Colombia, Mexico, Chile, Panama, Brazil, and Honduras. *Revista de Direito Econômico e Socioambiental*, 16(1), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.7213/revdireconsoc.v16i1.31904>
- UNIMINUTO. (2021). *Política de ética e integridad científica de la I+D+i+C* (pp. 1–8). https://portalweb-uniminuto.s3.us-east-1.amazonaws.com/activos_digitales/DocInstitucionales/Politicas/41-8.%20POL%C3%8DTICA%20DE%20%C3%89TICA%20E%20INTEGRIDAD%20CIEN%C3%8DFICA%20DE%20LA%20I%2BD%2Bi%2BC.pdf
- Villada Duque, F., López Lezama, J. M., & Muñoz Galeano, N. (2017). Effects of Incentives for Renewable Energy in Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 21(2). <https://www.redalyc.org/journal/477/47751131007/html/>
- Villegas, J. F., Ospino, I. T., & Día, A. P. (2024). Electrification as a development and sustainability approach in rural areas using renewable energy sources. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(4), 2115–2126. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.04.37>
- Zahid, H., Zulfiqar, A., Adnan, M., Iqbal, M. S., Shah, A., & Mohamed, S. E. G. (2025). Global renewable energy transition: A multidisciplinary analysis of emerging computing technologies, socio-economic impacts, and policy imperatives. *Results in Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105258>