



Diseño de un modelo de optimización para la localización estratégica de biorrefinerías en Colombia: un enfoque sostenible con biomasa residual

María Gabriel Pérez Barrios

Modalidad de Práctica
Trabajo de grado

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Asesor interno
Juan Villegas, PhD.
Asesor externo
Nora Cadavid, Dr.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Industrial
Medellín
2025

Cita	(Pérez María, 2025)
Referencia	Pérez María (2025). <i>Diseño de un modelo de optimización para la localización estratégica de biorrefinerías en Colombia: un enfoque sostenible con biomasa residual</i> . Trabajo de grado profesional. Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Grupo de investigación ALIADO



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mí misma, por ser valiente y, a pesar del miedo, enfrentar este camino y sacar adelante la investigación. Porque, a pesar de las dificultades, nunca me rendí y siempre di lo mejor de mí. A mis abuelas, Mone y Nuris, que ahora me cuidan desde el cielo, gracias por su amor incondicional. Siempre llevaré con orgullo sus enseñanzas, ¡Este logro es un homenaje a ustedes!.

A mi madre, Mónica, y a mi padre, Eduin, por ser mi ejemplo a seguir, por inspirarme a luchar por mis sueños y por brindarme lo mejor de sí mismos, ofreciéndome las oportunidades necesarias para alcanzar mis metas. A mi hermana María José, por ser mi cómplice y compañera incondicional, siempre apoyándome en cada idea. A mi hermanito José Gabriel, quien me inspira a dar lo mejor de mí para construir un futuro en el que pueda ser un ejemplo para él.

A mi amiga Melani, por estar siempre para mí y brindarme palabras de aliento, incluso desde la distancia. A Alfonso, por sacarme una sonrisa en los momentos más difíciles. A Edgard, por acompañarme cuando más lo necesité y por no dejarme sola. A mis amigos y todos aquellos que creyeron en mí y me apoyaron en mi proceso académico y personal, brindándome fuerza y motivación cuando más lo necesitaba. Este logro no habría sido posible sin el respaldo de quienes, con pequeños gestos o grandes acciones, me impulsaron a seguir adelante. Gracias por ser parte de este camino e inspirarme a continuar con determinación.

Dedico este logro también a todas las personas que trabajan incansablemente por un futuro más sostenible, y a las comunidades agrícolas de Colombia, cuyo esfuerzo inspira este trabajo. Este proyecto es un homenaje a quienes creen en el poder de la investigación para transformar realidades y construir un mundo mejor.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional y constante motivación a lo largo de este camino. A mis profesores y mentores, Juan Guillermo y Nora, quienes con su conocimiento, motivación y paciencia me guiaron para enfrentar este desafío. Al grupo de investigación ALIADO, por permitirme trabajar de la mano con sus docentes y participar de las múltiples sesiones de aprendizaje con sus miembros.

Al semillero de investigación SIS y a la profe Laura, por enseñarme el arte de investigar y por ayudarme a desarrollar capacidades críticas y metodológicas, fundamentales en la realización de este trabajo. Extiendo mi gratitud con Edgard, por motivarme día a día y ser mi guía, también con todos los que estuvieron dispuestos a ayudarme cuando lo necesité.

Finalmente, quiero agradecer a la vida por permitirme llegar a la Universidad de Antioquia y conocer a todas las personas que, de una u otra manera aportaron en mi recorrido académico y profesional. A quienes compartieron risas conmigo en el 20, almuerzos en la cafetería, bailes en el coliseo. Gracias por sacarme de mi zona de confort, por alegrar este tiempo de formación y por ser luces en mi camino.

Tabla de contenido

Resumen	12
Abstract	13
1 Introducción	14
2 Objetivos	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos especificos	17
3 Planteamiento del problema	18
4 Justificación	20
5 Marco teórico	22
5.1 Antecedentes	22
5.2 Modelos y métodos para la optimizacipon de cadenas de suministro de biomasa	23
5.3 Biomasa	26
5.4 Tipos de biomasa	27
5.5 Biomasa residual: características y potencial en Colombia	29
5.6 Biomasa residual agrícola	31
5.7 Biorrefinerías: definición y topologías	32
5.8 Cadena de suministro de la biomasa (BSC)	32
5.9 Quema de biomasa	35
5.10 Modelo de optmización en la planificación de localización	36
5.11 Modelos multiobjetivo	36

5.12	Aplicación de modelos de optimización en la localización de biorrefinerías . . .	36
6	Metodología	38
6.1	Técnicas e instrumentos	38
6.2	FASES	39
6.2.1	Fase 1: Revisión bibliográfica y marco teórico	39
6.2.2	Fase 2: Identificación y caracterización de la biomasa residual	39
6.2.3	Fase 3: Diseño del modelo de optimización	40
6.2.4	Fase 4: Validación del modelo	40
6.2.5	Fase 5: Aplicación del modelo en un estudio de caso	40
6.2.6	Fase 6: Análisis de resultados y conclusiones	41
7	Estudio de caso: cascarilla de arroz	41
7.1	Origen, Composición y Potencial de Aprovechamiento	42
7.2	Procesos de valorización de la cascarilla de arroz en bioproductos	44
8	Modelo de optimización multiobjetivo	46
8.1	Conjuntos	46
8.2	Variable de decisión	47
8.3	Parámetros	48
8.3.1	Cantidad de biomasa	48
8.3.2	Económicos	48
8.3.3	Transporte	49
8.3.4	Ambientales	50

8.3.5	Sociales	50
8.4	Función objetivo	51
8.5	Restricciones	52
9	Resultados.	54
9.1	Parámetros	54
9.1.1	Localización geográfica de la cascarilla de arroz, y volumen de producción	54
9.1.2	Distancias y transporte	56
9.1.3	Tecnologías para la producción de bioproductos	56
9.1.4	Capacidades y rendimientos por tecnología	56
9.1.5	Ingresos por bioproductos y emisiones evitadas	57
9.1.6	Costos de producción	58
9.1.7	Costos de inversión	58
9.1.8	Costos de almacenamiento	59
9.1.9	Impacto ambiental y emisiones	60
9.1.10	Empleos generados	62
9.2	Validación del modelo	62
9.2.1	Ubicación de las biorrefinerías	63
9.2.2	Emisiones y empleos	65
9.2.3	Análisis de viabilidad financiera	66
9.2.4	Impacto del costo social en la rentabilidad	68
9.2.5	Identificación de valores críticos para la rentabilidad	68
9.2.6	Análisis de bioproductos según la variación del costo social	70

9.2.7	Análisis de prioridad: reducción de emisiones vs producción de bioproductos	71
10	Conclusiones	72
11	Limitaciones	75
12	Recomendaciones y trabajos futuros	76
	Referencias	78
	Referencias Legales	89
	Anexos	90
	Anexo 1. Resultados del modelo	91

Lista de tablas

1	Principales investigaciones en optimización de cadenas de suministro de biomasa.	25
2	Poder calórico inferior para biomasa residual en Colombia	30
3	Descripción de los términos de la función objetivo	51
4	Producción de cascarilla de arroz en molinos seleccionados	55
5	Producción y rendimiento por tecnología.	57
6	Costo de operación por tecnología.	58
7	Costo de inversión por tecnología.	58
8	Costos de operación y almacenamiento por ciudad.	61
9	Emisiones de CO_2 por tipo de vehículo.	62
10	Costo social, producción y rendimiento de bioproductos.	70

Lista de figuras

1	Categorías de biomasa	28
2	Elementos relativos a la operación de una biorrefinería	33
3	Cadena de suministro de la biomasa energética	35
4	Diagrama de flujo de la metodología	39
5	Generación de productos y sus usos, a través de la producción agrícola del arroz.	43
6	Componentes del arroz palay.	44
7	Ubicaciones con biomasa disponible en Colombia.	54
8	Ubicaciones para puntos de acopio y biorrefinerías escenarios con IVE = 5 y 25.	64
9	Ubicaciones para puntos de acopio y biorrefinerías escenarios con IVE = 132.	65
10	Emisiones y empleos generados.	66
11	Variación del VPN y TIR para IVE = 5, con diferentes horizontes	67
12	Variación del VPN y TIR para iguales horizontes y diferentes IVE.	68
13	Variación del IVE con 5 biorrefinerías.	69
14	Ingresos vs IVE.	72

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACV	Análisis de ciclo de vida
AHP	Proceso analítico jerárquico
BECCS	Captura y almacenamiento de carbono
BSC	Cadena de suministro de biomasa
CBC	Coin-Branch and Cut
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de carbono
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
KE	Extracción Kraft
km	Kilómetros
LE	Extracción de lignosulfonato
MILP	Programación lineal entera mixta
NPS	Nanoporosa de sílice
N_2O	Óxido nitroso
OE	Extracción organosolv
PSO	Optimización por enjambre de partículas
SE	Extracción de refrescos
Ton	Toneladas
TP	Problemas de transbordo
TSP	Problema del viajante
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
VRP	Problema de ruteo de vehículos

Resumen

El modelo desarrollado demostró ser una herramienta eficaz y flexible para modelar y de esta manera promover la sostenibilidad ambiental en la planificación de cadenas de suministro de biomasa residual en Colombia. Basado en programación lineal entera mixta (MILP) y desarrollado en Python, optimiza la localización de biorrefinerías y puntos de acopio considerando criterios económicos, ambientales y sociales. Fue probado con cascarilla de arroz como biomasa principal, utilizando parámetros como rendimientos tecnológicos, costos logísticos y emisiones de CO_2 evitadas. Se evaluaron distintos escenarios con variaciones en el número de biorrefinerías (2, 5 y 10), el horizonte de inversión (5, 7, 10, 15 y 20 años) y el costo social del carbono (5, 25 y 132 USD/ton CO_2). Los resultados indican que un horizonte de inversión de 20 años con 10 biorrefinerías es la configuración más rentable, alcanzando un Valor Presente Neto (VPN) de positivo USD y una Tasa Interna de Retorno (TIR) superior al 23%. El costo social del carbono influye directamente en la viabilidad del sistema: con 5 USD/ton CO_2 , la rentabilidad depende de la venta de nanopartículas de sílice (NPS), mientras que con 132 USD/ton CO_2 , la producción de biochar se prioriza por su alto impacto en la reducción de emisiones. El modelo muestra que valorar mejor los costos ambientales no solo hace que el proyecto sea más rentable, sino que también contribuye a su sostenibilidad a largo plazo. Se recomienda en futuras investigaciones diversificar la producción y ajustar el costo social del carbono para alinear el modelo con estándares internacionales, optimizando su viabilidad económica y ambiental.

Palabras clave: Localización de biorrefinerías, Biomasa residual, Diseño de cadenas de suministro, Sostenibilidad, Colombia.

Abstract

The developed model proved to be an effective and flexible tool for modeling and, in turn, promoting environmental sustainability in the planning of residual biomass supply chains in Colombia. Based on mixed-integer linear programming (MILP) and developed in Python, it optimizes the location of biorefineries and collection points while considering economic, environmental, and social criteria. It was tested using rice husk as the primary biomass, incorporating parameters such as technological yields, logistical costs, and avoided CO_2 emissions. Various scenarios were evaluated, varying the number of biorefineries (2, 5, and 10), the investment horizon (5, 7, 10, 15, and 20 years), and the social cost of carbon (5, 25, and 132 USD/ton CO_2). The results indicate that an investment horizon of 20 years with 10 biorefineries is the most profitable configuration, achieving a positive Net Present Value (NPV) and an Internal Rate of Return (IRR) above 23%. The social cost of carbon directly influences the system's viability: at 5 USD/ton CO_2 , profitability relies on the sale of silica nanoparticles (NPS), whereas at 132 USD/ton CO_2 , biochar production is prioritized due to its significant impact on emission reduction. The model shows that better valuation of environmental costs not only increases project profitability but also enhances its long-term sustainability. Future research should focus on diversifying production and adjusting the social cost of carbon to align the model with international standards, optimizing its economic and environmental feasibility.

Keywords: Biorefinery location, Residual biomass, Supply chain design, Sustainability, Colombia.

1 Introducción

La creciente preocupación por el cambio climático ha llevado a la búsqueda de alternativas energéticas más sostenibles y ecológicas, esto debido a que el sistema energético mundial está experimentando una transformación hacia energías renovables, que representaron el 86 % de la capacidad añadida en 2023, según datos de la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, 2024). Este crecimiento, aunque desigual en todo el mundo, refleja la necesidad de transitar hacia fuentes más sostenibles para mitigar las altas emisiones de gases de efecto invernadero. Esta problemática ha impulsado la investigación en energías renovables que disminuyan estas emisiones, siendo la biomasa residual una opción destacada por su capacidad para reducir la huella de carbono (Gómez Quiceno et al., 2022).

En este contexto, el aprovechamiento de la biomasa residual no solo se presenta como una alternativa para la reducción de emisiones, sino como una oportunidad para generar bioproductos de alto valor agregado, que pueden sustituir insumos industriales contaminantes y mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos. A diferencia de las fuentes de energía renovable convencionales, la biomasa residual permite la producción de celulosa, lignina y biochar, materiales con aplicaciones clave en diversas industrias y con un impacto positivo en la reducción de gases de efecto invernadero.

Uno de los mayores desafíos en la agricultura actual es la degradación del suelo por prácticas insostenibles, como la quema de residuos de cosecha y el uso excesivo de fertilizantes químicos. En este contexto, bioproductos como el biochar han demostrado ser clave para la regeneración de suelos, mejorando la retención de agua y nutrientes, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y contribuyendo a la captura de carbono. Asimismo, la producción de celulosa y lignina a partir de biomasa residual permite sustituir materiales no renovables en diversas aplicaciones industriales y fomenta una industria más sostenible.

De esta manera el aprovechamiento eficiente de la biomasa no solo reduce las emisiones de GEI entre un 80 % y un 90 % (Change et al., 2014), sino que también representa una oportunidad para el desarrollo de nuevas cadenas de valor basadas en recursos renovables. En este sentido, Colombia, un país con abundantes recursos de biomasa residual provenientes de actividades agrícolas, pecuarias y forestales, tiene un gran potencial para impulsar el desarrollo sostenible a través de la implementación de biorrefinerías. (Sanchita y Mira, 2024). Estas instalaciones pueden transformar la biomasa en productos de alto valor añadido, más allá de la valorización energética, contribuyendo no solo a la mitigación del cambio climático, sino también al desarrollo económico y social de las regiones rurales del país (Álvarez-López

et al., 2023).

No obstante, la localización de biorrefinerías en Colombia enfrenta desafíos significativos debido a la dispersión geográfica de la biomasa, las deficiencias en la infraestructura de transporte, y los altos costos asociados al manejo y logística. Zandi Atashbar et al. (2018a) estiman que los costos logísticos pueden representar hasta el 50% del costo total de la biomasa como materia prima, lo que resalta la necesidad de una planificación cuidadosa y eficiente.

La problemática también se encuentra alineada con iniciativas nacionales como el Plan de Acción para la Gestión Sostenible de la Biomasa Residual (MinAmbiente, 2022) y la Estrategia Nacional de Economía Circular (MinAmbiente, 2019), que reconocen la importancia del aprovechamiento de la biomasa como una estrategia clave para mitigar el cambio climático y fomentar el desarrollo territorial. Estas políticas buscan incrementar el uso sostenible de biomasa en un 20% en la próxima década, promoviendo la implementación de nuevas tecnologías y modelos de negocio innovadores.

Sin embargo, la localización eficiente de estas instalaciones presenta retos significativos debido a la dispersión geográfica de las fuentes de biomasa, las limitaciones logísticas y la necesidad de integrar criterios ambientales, económicos y sociales en la toma de decisiones. La implementación de modelos matemáticos multiobjetivo puede facilitar la optimización de la localización de biorrefinerías, considerando factores como costos operativos, emisiones de CO_2 y generación de empleo (Calderón et al., 2014).

El problema abordado en este estudio es precisamente la falta de un modelo optimizado para la localización de biorrefinerías en Colombia que integre criterios económicos, sociales y ambientales. Este modelo es esencial para asegurar que las decisiones sobre la ubicación de estas instalaciones no solo sean económicamente viables, sino que también promuevan la sostenibilidad y el desarrollo regional.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un modelo de optimización para la localización eficiente de biorrefinerías en Colombia, utilizando biomasa residual como materia prima. Para cumplir con este objetivo, se identificará y caracterizará la biomasa residual disponible en el país, se diseñará un modelo multiobjetivo que contemple factores económicos, ambientales y sociales, y se aplicará este modelo en un estudio de caso local para validar su efectividad.

La ejecución de este proyecto incluirá una metodología que combina enfoques cualitativos y cuantitativos, utilizando técnicas de modelación y simulación computacional para

desarrollar el modelo de optimización propuesto. La investigación se estructura en fases que incluyen la recopilación y análisis de datos, el diseño del modelo, y la validación mediante un estudio de caso, lo que permitirá obtener resultados aplicables en el contexto colombiano.

El impacto que genera esta iniciativa radica en su capacidad para contribuir a la construcción de un futuro más sostenible en Colombia, no solo desde la perspectiva ambiental, sino también desde el desarrollo económico y social de sus regiones más vulnerables. En términos ambientales, el proyecto contribuirá a la reducción de emisiones de CO_2 al evitar la descomposición de la biomasa en vertederos o su quema a cielo abierto y promover la utilización eficiente de recursos. Desde una perspectiva social, la implementación de este sistema tiene el potencial de generar empleo y fomentar el desarrollo en comunidades rurales. Finalmente, desde el punto de vista económico, la optimización de los costos y la valorización de los bioproductos permitirá incrementar la competitividad del sector bioindustrial en el país.

Así, esta investigación pretende proporcionar una herramienta computacional que facilite la toma de decisiones en la configuración de cadenas de suministro de biomasa, maximizando el impacto positivo sobre la economía, el medio ambiente y la sociedad.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de optimización que permita la localización eficiente de biorrefinerías en Colombia, utilizando biomasa residual como materia prima, con el fin de facilitar la planeación estratégica y mejorar la sostenibilidad y viabilidad económica de estas instalaciones.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar una fuente de biomasa residual disponible en Colombia, considerando su localización geográfica, volumen de producción, y características técnicas relevantes para su aprovechamiento en biorrefinerías.
- Diseñar y desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo que integre criterios económicos, ambientales y sociales para la localización de biorrefinerías en Colombia, utilizando la biomasa residual como insumo principal.
- Aplicar y validar el modelo de optimización propuesto en un estudio de caso local en Colombia, evaluando su efectividad para identificar ubicaciones óptimas y generar estrategias de implementación que maximicen los beneficios económicos y minimicen los impactos ambientales.

3 Planteamiento del problema

El desarrollo de la Revolución Industrial marcó un punto de inflexión en la historia de la humanidad, el cual fue caracterizado por el aumento del uso de máquinas y avances científicos que mejoraron la calidad de vida de las personas. Sin embargo, este desarrollo también generó una significativa contaminación ambiental, agotando recursos bióticos esenciales como el suelo, el agua y el aire (Pereira y Martínez, 2024). Esta problemática ha contribuido directamente al cambio climático, un fenómeno caracterizado por variaciones en la temperatura, los patrones de precipitación y los vientos. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones excesivas de gases de efecto invernadero (GEI) ha causado un calentamiento global sin precedentes (Rodríguez Granados et al., 2023).

En los últimos 125.000 años, la década más reciente ha sido la más cálida, lo que ha generado daños irreversibles en la naturaleza y en la vida humana. Actividades como el uso de fertilizantes en la agricultura, la ganadería extensiva, la combustión de combustibles fósiles, el manejo de residuos sólidos y el tratamiento de aguas residuales han sido identificadas como principales responsables de la emisión de GEI (Parlamento Europeo, 2023). En estos encontramos gases como el CO_2 , el CH_4 y el N_2O los cuales están presentes en grandes cantidades, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles, incendios forestales y deforestación (Rodríguez Granados et al., 2023).

Sin embargo, el impacto del cambio climático no se limita solo al ambiente; este también afecta infraestructuras críticas, incluidas las relacionadas con el suministro energético y la producción de materiales esenciales para diversas industrias. Esto plantea riesgos significativos para la seguridad energética, especialmente en contextos donde el abastecimiento depende de recursos externos. La Conferencia de las Partes (COP28) señaló con preocupación que las actividades humanas han incrementado la temperatura global en 1,1 °C y que las emisiones acumuladas de CO_2 ya representan cuatro quintas partes del presupuesto total de carbono necesario para limitar el aumento de temperatura a 1,5 °C (IEEE, 2024).

Ahora bien, uno de los procesos naturales que se ha visto afectado negativamente es el ciclo del carbono, este es fundamental para la regulación de los ecosistemas, sin embargo, ha sido alterado significativamente por la actividad humana. Esto principalmente por el uso de combustibles fósiles, ya que ha liberado cantidades masivas de carbono que estaban almacenadas en el suelo durante millones de años, desequilibrando el ciclo natural (Pereira y Martínez, 2024). Estudios afirman que más del 80 % del consumo energético global depende

de combustibles fósiles, lo que contribuye directamente a la crisis climática (Liu, 2023).

Ante esta realidad, se vuelve una necesidad explorar fuentes de energía renovable que reduzcan las emisiones de GEI y fomenten la valorización de residuos biomásicos en productos de alto valor agregado. Es por esto que la biomasa residual se destaca como una solución prometedora. Además de su uso como fuente energética, la biomasa puede transformarse en bioproductos como biochar y lignina, los cuales tienen aplicaciones en la mejora del suelo, la captura de carbono y la producción de materiales industriales, sustituyendo productos derivados del petróleo y otros insumos de alto impacto ambiental (Srivastava and Pandey, Srivastava y Pandey). Al descomponerse o quemarse en una biorrefinería, el CO_2 liberado es el proveniente del carbono previamente capturado por las plantas, por lo que no altera significativamente el ciclo del carbono (Torres-Morales et al., 2023).

A pesar de su potencial, el uso de biomasa enfrenta desafíos logísticos que representan hasta el 90% de los costos totales de producción de bioproductos y biocombustibles (Gómez Quiceno et al., 2022). Estos factores incluyen la dispersión geográfica de las fuentes de biomasa, su incertidumbre en la cadena de suministro y su baja densidad energética, lo que incrementa los costos de transporte y almacenamiento (Pereira y Martínez, 2024). Además, la variabilidad en la composición de la biomasa puede afectar la eficiencia de los procesos de conversión, lo que hace necesario un diseño estratégico de la infraestructura de acopio y procesamiento.

En este contexto, es importante diseñar modelos de optimización que aborden estas problemáticas. El desarrollo de estrategias logísticas adecuadas permitiría determinar la ubicación óptima de biorrefinerías capaces de transformar la biomasa residual en bioproductos de alto valor, reduciendo costos y maximizando la rentabilidad del sistema. Modelos adaptados a las particularidades y condiciones geográficas y climáticas de regiones como Colombia pueden maximizar la eficiencia operativa y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental (Lo et al., 2021).

La transición hacia el aprovechamiento de biomasa residual como fuente de bioproductos y energía renovable es crucial para enfrentar los desafíos del cambio climático, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y promover el desarrollo sostenible. Este trabajo busca contribuir al diseño de estrategias logísticas y de localización que hagan viable y sostenible la implementación de biorrefinerías en Colombia, ofreciendo un modelo que también podría replicarse en otras regiones con características similares.

4 Justificación

La realización de un modelo de localización de biorrefinerías y la identificación de su ubicación óptima son fundamentales para aprovechar de manera sostenible la biomasa en Colombia, país que cuenta con un gran potencial en recursos agrícolas y forestales. Este presenta una oportunidad para aprovechar de manera estratégica biomasa residual como la cascarilla de arroz y el bagazo de caña, recursos claves para la transición hacia fuentes de energía renovables (Patel et al., 2025).

Este trabajo es importante porque contribuye a la reducción de emisiones de CO_2 , generar empleo en las regiones, y fomentar el desarrollo económico local, al mismo tiempo que se promueve un modelo de producción más limpia (Ezeorba et al., 2024; Durán-Aranguren et al., 2025). Este además contribuye a la necesidad de impulsar tecnologías limpias que promuevan el desarrollo bajo en carbono, alineándose con la Ley 1715 de 2014, que impulsa las energías renovables; la Ley 2169 de 2021, que establece metas de carbono neutralidad y resiliencia climática; el Decreto 690 de 2021, que regula el uso sostenible de recursos naturales; y la Resolución 082361 de 2020, que respalda investigaciones en biocombustibles, reforzando la viabilidad y el impacto positivo de este tipo de iniciativas.

El aprovechamiento de biomasa residual permite mitigar el cambio climático al evitar la acumulación de desechos en vertederos y reducir las emisiones generadas por su descomposición. Además, de contribuir al cierre de ciclos de materiales, mejorando la salud del suelo y promoviendo economías circulares en las regiones agrícolas del país (Singh et al., 2024). Con la realización de este proyecto se busca facilitar la maximización de estos beneficios al reducir las emisiones asociadas al transporte y mejorar la eficiencia energética de los procesos de transformación de biomasa (Holub et al., 2022; Ye, 2024).

Desde el punto de vista social, el desarrollo de biorrefinerías podría impactar positivamente en comunidades rurales, generando empleo y reduciendo desigualdades territoriales. Al ubicar estas instalaciones de manera descentralizada, se promueve una mayor equidad social y se favorece la integración económica en áreas que han sido tradicionalmente marginadas por el estado. Así mismo, se promueve el desarrollo local de estos territorios y se fortalece el conocimiento (Wagh et al., 2024; Santos et al., 2024).

En términos económicos, se ofrece un modelo viable para reducir costos logísticos, uno de los principales componentes del costo total de los bioproductos. Mediante el uso de modelos matemáticos multiobjetivo, se pueden relacionar costos de transporte e infraestruc-

tura con criterios ambientales y sociales, logrando así soluciones sostenibles y rentables que impulsen la competitividad del sector bioindustrial (Stellingwerf et al., 2022; Berezka y et al., 2021). Además, que según estudios recientes, el manejo adecuado de cadenas de suministro sostenibles puede reducir considerablemente los costos logísticos y mejorar la eficiencia en el aprovechamiento de recursos biomásicos (Jana et al., 2022).

Desde una perspectiva científica, este proyecto aporta un enfoque novedoso al integrar herramientas avanzadas de modelado con datos adaptados al contexto colombiano. Esta aproximación no solo enfrenta los desafíos asociados con el diseño de cadenas de suministro sostenibles, sino que también proporciona información útil para la planificación territorial y la formulación de políticas públicas. Asimismo, establece un modelo que puede ser replicado en otros países en desarrollo, contribuyendo al conocimiento global sobre la optimización de la bioeconomía y la gestión sostenible de recursos (Clavijo-Buritica et al., 2023; González Velasco et al., 2023).

5 Marco teórico

5.1 Antecedentes

La biomasa ha emergido como una fuente alternativa valiosa de materias primas y energía, destacándose por su potencial para reducir la huella de carbono en comparación con los combustibles fósiles. En este contexto, el diseño óptimo de plantas de procesamiento y la planificación eficiente de la cadena de suministro se han vuelto cruciales para garantizar que el balance de carbono asociado sea efectivamente neutro o negativo, o al menos más favorable que el derivado del uso de fuentes convencionales.

Diversos estudios académicos han abordado esta problemática mediante herramientas como el análisis de ciclo de vida (ACV), que permite estimar las emisiones y otros impactos ambientales de los productos generados a lo largo de toda la cadena de suministro. Este análisis abarca desde la provisión de energía y transporte hasta el uso y disposición final de los productos (De Meyer et al., 2014). Más allá de las emisiones generadas en la operación de las biorrefinerías y el consumo de biocombustibles y bioproductos, es fundamental considerar los impactos ambientales de toda la cadena de suministro para obtener una evaluación integral.

La literatura sobre el diseño de cadenas de suministro de biomasa revela la complejidad de este problema, que incluye la necesidad de decisiones óptimas en la localización de instalaciones, la selección de materias primas, las tecnologías de procesamiento y la atención a la demanda de bioproductos y bioenergía. Herramientas computacionales han sido empleadas para optimizar tanto las decisiones estratégicas como las tácticas, considerando las restricciones de disponibilidad de materias primas, que dependen de ciclos agrícolas.

Zahraee et al. (2020), Atashbar et al. (2016), Durmaz y Bilgen (2020), y Sharma et al. (2013) han realizado revisiones exhaustivas sobre la planificación de cadenas de suministro de biomasa, destacando la aplicación de herramientas de simulación, análisis multicriterio y modelos de optimización. Aunque se han empleado métodos exactos, la complejidad del problema a menudo requiere el uso de soluciones heurísticas, particularmente cuando se incorporan factores como la incertidumbre climática y la fluctuación en los precios del petróleo.

En cuanto a estudios específicos, Negri et al. (2021) han investigado el diseño de una cadena de suministro de bioenergía en la Unión Europea, considerando cinco eslabones que incluyen la captura y almacenamiento de carbono. Sus resultados sugieren estrategias para la composición de materias primas, la localización de biorrefinerías y el flujo de materiales,

todo ello optimizado en función de costos y tres categorías de impacto ambiental.

Razak et al. (2021) abordaron la localización de una biorrefinería en Malasia, incorporando la disponibilidad de materias primas, el impacto socioeconómico y la efectividad financiera y ambiental. Utilizaron el proceso analítico jerárquico (AHP) para verificar la solidez de las soluciones obtenidas mediante modelos de optimización.

Por su parte, Masoomi et al. (2022) aplicaron el método “mejor-peor” (BWM) para evaluar criterios económicos, sociales y ambientales en la selección de ubicaciones para biorrefinerías en Irán, basándose en datos de expertos. Chen y Önal (2014) desarrollaron un modelo entero mixto para la localización de biorrefinerías en Estados Unidos, enfrentando desafíos computacionales que resolvieron mediante descomposición en etapas. Este estudio destacó la relación entre la planificación territorial y los resultados del modelo de optimización.

Finalmente, trabajos como el de Van Dyken et al. (2010), Dokl et al. (2024) en México y Zandi Atashbar et al. (2018a) en Francia, han aplicado modelos de MILP para el diseño de cadenas de suministro de biomasa, incorporando diversas consideraciones de sostenibilidad, desde la evaluación económica y ambiental hasta la generación de empleos.

En Colombia, los estudios sobre modelos matemáticos para el diseño de cadenas de suministro de biomasa son diversos y se centran en la planificación integral para materias primas específicas o tipos de bioproductos (Aslani et al., 2024). Este trabajo busca superar algunos de los desafíos identificados en estudios anteriores al incluir diversos escenarios proporcionando una herramienta que integre consideraciones económicas, ambientales y sociales en la planificación de la localización de biorrefinerías a nivel nacional.

5.2 Modelos y métodos para la optimización de cadenas de suministro de biomasa

Lo et al. (2021), Zahraee et al. (2020) y Zandi Atashbar et al. (2018b) realizaron revisiones de bibliografías profundas, en la que destacaron, aunque los modelos estocásticos fueron menos frecuentes, su capacidad para abordar incertidumbres reales los hace esenciales. Los modelos determinísticos, caracterizados por utilizar datos fijos para producir resultados consistentes, fueron destacados por Shabani et al. (2013), quienes los clasificaron como aquellos que no consideran incertidumbres en las entradas.

Maronese et al. (2015) integraron un modelo determinístico basado en la MILP para

optimizar el suministro de biomasa en la producción de bioetanol. Por otro lado, los modelos estocásticos incorporan incertidumbres en parámetros clave como disponibilidad de biomasa, costos de transporte y demanda de productos. Kristianto y Zhu (2017) utilizaron un modelo estocástico para optimizar la cadena de suministro de bioetanol, evaluando su sostenibilidad económica, social y ambiental, mientras que Hu et al. (2017) emplearon simulación de Monte Carlo para evaluar los impactos de incertidumbres en precios y costos.

Por su parte, los Problemas de Transbordo (TP) fueron abordados por Herer et al. (2006), quienes modelaron redes logísticas que incluyen nodos intermedios para almacenamiento y redistribución. Malladi et al. (2018) aplicaron este modelo para optimizar la logística de biomasa considerando impactos ambientales. En cuanto a los Problemas de Mezcla, Lim y Lam (2016) propusieron un modelo para combinar diferentes tipos de biomasa y mejorar su eficiencia en procesos de conversión. Finalmente, Nasiri y Zaccour (2009) emplearon teorías de juegos para predecir la dinámica de cadenas de suministro no cooperativas de biomasa mediante Modelos de Equilibrio.

Las simulaciones son herramientas clave para evaluar el rendimiento técnico y económico de la biomasa. Chen y Önal (2014) utilizaron Aspen Plus para simular el proceso de torrefacción, complementado con cálculos manuales para estimar costos, mientras que Morya et al. (2022) implementaron un modelo híbrido que incluye simulación de gasificación, evaluación económica y optimización de rutas de producción. Además, el análisis de sensibilidad permite identificar los parámetros más críticos en la viabilidad de las cadenas de suministro. Uslu et al. (2008) evaluaron el impacto de factores como costos de inversión, tasas de interés y distancias de transporte en la rentabilidad, mientras que Pantaleo et al. (2014) analizaron las fluctuaciones en la densidad de energía y los costos logísticos.

En el contexto del Big Data y el análisis predictivo, Hu et al. (2017) implementaron sistemas CyberGIS para realizar análisis de incertidumbre y optimizar cadenas de suministro, mientras que Garcia y You (2015) utilizaron herramientas de Big Data para diseñar cadenas de suministro a gran escala. Estos enfoques combinados representan una oportunidad significativa para mejorar la robustez y la aplicabilidad de las evaluaciones.

Entre las limitaciones de los métodos destacan que los modelos determinísticos tienden a ser ideales y no capturan la variabilidad real del sistema. Por otro lado, los modelos estocásticos, aunque más realistas, enfrentan retos relacionados con la recolección de datos históricos y la complejidad computacional. La integración de simulaciones y modelos matemáticos ha demostrado ser una solución eficaz (Cuervo Cruz et al., 2021).

La Tabla 1 muestra algunos de los elementos destacables en los modelos de algunos de los autores mencionados:

Tabla 1

Principales investigaciones en optimización de cadenas de suministro de biomasa.

Autores	Principales Diferenciadores	Año
Panichelli y Gnansounou (2008)	Método basado en GIS combinado con algoritmos de asignación para la localización de instalaciones de energía de biomasa.	2007
López et al. (2008)	Encontraron facilidad de implementación y menor tiempo computacional en la localización de plantas usando PSO.	2008
Rentizelas y Tatsiopoulos (2010)	Optimización del almacenamiento de biomasa mediante programación lineal entera, considerando ubicaciones óptimas para biorefinerías y sistemas de almacenamiento en Grecia.	2009
Rentizelas y Tatsiopoulos (2010)	Desarrollo de modelos heurísticos para determinar la ubicación óptima de plantas bioenergéticas y sistemas de almacenamiento regional.	2009
Rentizelas y Tatsiopoulos (2010)	Utilizaron los métodos estocásticos y optimización exacta para la maximización del rendimiento financiero y soporte a decisiones para ubicación y operación de instalaciones.	2010
Chen y Önal (2014)	Mediante un modelo de MILP encontraron respuestas dinámicas del mercado agrícola y ventajas regionales en la localización de biorrefinerías.	2014
Maronese et al. (2015)	A través del método de restricción de cortes enteros (ICC) aplicado a MILP realizaron una comparación exhaustiva de rutas alternativas y subóptimas en la conversión de biomasa.	2015
Zandi Atashbar et al. (2018a)	Análisis crítico de modelos de optimización en BSC, destacando la necesidad de manejar incertidumbres en el suministro de biomasa y reducir costos logísticos.	2018

Autores	Principales Diferenciadores	Año
Zandi Atashbar et al. (2018b)	Discute la importancia de la logística en la cadena de suministro de biomasa, señalando que representa hasta el 50 % del costo total.	2018
Razik et al. (2019)	En su modelo lograron la optimización de costos operativos y rutas de procesamiento con un modelo basado en superestructuras.	2019
Zahraee et al. (2020)	Identifica la falta de modelos integrados multi-objetivo que aborden simultáneamente aspectos económicos, sociales y ambientales.	2020
Zahraee et al. (2020)	Propone modelos basados en simulación dinámica y de eventos discretos para evaluar el impacto de la eficiencia logística y tecnológica en la sostenibilidad ambiental de cadenas de suministro de biomasa.	2020
Mantovani y Gibson (1992)	Modelo de simulación basado en GASP IV para evaluar costos logísticos y disponibilidad de biomasa bajo diferentes escenarios climáticos.	2020
Lo et al. (2021)	Destaca la importancia de herramientas como simulación y programación multiobjetivo para la planificación estratégica y operativa.	2021
Negri et al. (2021)	Utiliza un modelo de evaluación del ciclo de vida (LCA) para optimizar la cadena de suministro BECCS en Europa. Muestra mejoras del 23 % en indicadores ambientales con un incremento del 45 % en costos.	2021
Goswami et al. (2022)	Identificaron ventajas y limitaciones en tecnologías avanzadas para biorefinerías mediante una revisión crítica de literatura.	2022

5.3 Biomasa

Biomasa se refiere a todos los materiales biológicos no fosilizados presentes en la Tierra, incluyendo residuos forestales y agrícolas, cultivos energéticos, desechos industriales y alimentarios, residuos municipales, estiércol animal y algas (Fantini, 2017). Como fuente re-

novable, la biomasa ha sido utilizada históricamente para satisfacer necesidades energéticas y no energéticas, abarcando aplicaciones como la generación de calor, electricidad y biocombustibles (Speight, 2022). Además, con el avance de la tecnología, sus derivados han ganado relevancia en áreas como el almacenamiento de energía y la producción de materiales para supercondensadores electroquímicos (Shahbeik y Peng, 2024).

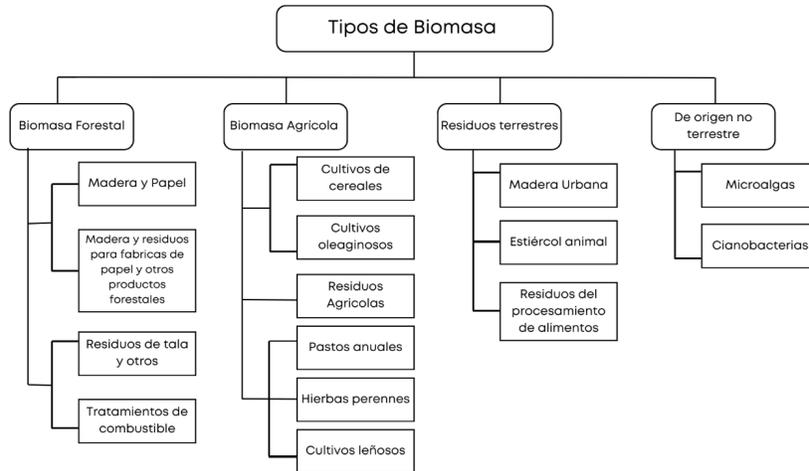
Más allá de su valor energético, la biomasa desempeña un papel crucial en la sostenibilidad ambiental al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante tecnologías de conversión como la pirólisis, la gasificación y la digestión anaeróbica (Aziz y Shah, 2023). Sin embargo, su aprovechamiento presenta desafíos, como la disponibilidad de recursos, el uso del suelo y las limitaciones tecnológicas. La optimización de su uso requiere un enfoque integral que considere tanto la eficiencia económica como el impacto ambiental para garantizar su contribución sostenible al sistema energético global (Fantini, 2017).

5.4 Tipos de biomasa

La biomasa, como recurso renovable, se clasifica en diversas categorías dependiendo de su origen y características. Según Zandi Atashbar et al. (2018a), las principales categorías de biomasa incluyen biomasa de origen forestal, agrícola, residuos terrestres y fuentes no terrestres, como se muestra en la Figura 1. Cada una de estas tiene características únicas y pueden ser aplicadas en distintos procesos de conversión bioenergética y bioquímica.

La biomasa de origen forestal incluye residuos de madera derivados de actividades industriales como la producción de pulpa y papel, así como restos de tala, que abarcan ramas, cortezas y otros materiales sobrantes de la actividad forestal. Adicionalmente, los tratamientos para combustible, como astillas de madera, se utilizan ampliamente en la producción de bioenergía. Este tipo de biomasa es una de las fuentes más tradicionales para la generación de energía renovable y su manejo depende de estrategias de logística y recolección eficientes (Zandi Atashbar et al., 2018a; Hazir et al., 2023). Algunos de estos hacen parte de los materiales lignocelulósicos formados por celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales provienen de las paredes celulares de las plantas y se utilizan en procesos termoquímicos como la pirólisis y la gasificación Shahbeik et al. (2024).

La biomasa agrícola por otro lado abarca cultivos de granos, oleaginosas, residuos agrícolas, pastos anuales y perennes, y cultivos leñosos. Esta incluye residuos de cultivos, como paja, cáscaras y tallos, los cuales son utilizados frecuentemente en procesos de combustión

Figura 1*Categorías de biomasa*

Nota. Adaptado de (Dahlquist y Bundschuh, 2013).

para la generación de energía. Los cultivos energéticos, como el pasto varillan y el miscanthus, son otro componente relevante de esta categoría, ya que son plantas que al ser cultivadas específicamente con fines energético presentan un crecimiento rápido siendo ideales para la producción de biocombustibles (Lim et al., 2021; Hazir et al., 2023).

Los residuos terrestres comprenden tanto desechos urbanos como industriales. Entre estos se encuentran residuos de madera urbana, estiércol animal y desechos del procesamiento de alimentos. Estos materiales pueden ser convertidos en energía mediante tecnologías avanzadas, como la digestión anaeróbica, que produce biogás, o mediante procesos termoquímicos. (Lo et al., 2021; Hazir et al., 2023).

Finalmente, las fuentes de biomasa no terrestre incluyen organismos acuáticos, como microalgas y cianobacterias. Estas se destacan por sus altas tasas de crecimiento y su capacidad para producir biocombustibles, como biodiésel, de manera sostenible (Hazir et al., 2023).

5.5 Biomasa residual: características y potencial en Colombia

La biomasa residual se refiere a los materiales orgánicos que quedan como subproductos o desechos en actividades agrícolas, forestales e industriales. Estos materiales tienen un alto potencial para ser convertidos en bioenergía, biocombustibles y otros productos de valor agregado, lo que contribuye a una economía circular y reduce la dependencia de recursos no renovables (Pardo Cuervo et al. (2024). Javourez et al. (2024) destacan que el uso efectivo de la biomasa residual puede mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que desempeña un papel crucial en las estrategias de mitigación del cambio climático. Además, Brás et al. (2024) enfatizan la importancia de comprender la composición y las características de la biomasa residual para optimizar su conversión en biocombustibles. Sin embargo, Qian et al. (2024) señalan que la variabilidad en la calidad de la biomasa puede plantear desafíos para la producción consistente de energía. En general, si bien la biomasa residual presenta numerosas oportunidades, una gestión cuidadosa y los avances tecnológicos son esenciales para maximizar sus beneficios Siol et al. (2023).

Colombia cuenta con un vasto recurso de biomasa residual, con un potencial estimado de 40 millones de toneladas anuales provenientes de residuos agrícolas, forestales y agroindustriales (Sanchez et al. (2024). Estos residuos presentan variaciones en su composición química, contenido de humedad y poder calorífico, lo cual es crucial para diseñar un modelo de optimización que considere estas características al seleccionar las ubicaciones más adecuadas para las biorrefinerías (Ortiz-Sanchez et al. (2024). Además, el aprovechamiento de esta biomasa residual puede contribuir significativamente al desarrollo rural y a la mitigación del cambio climático en el país.

Según la UPME (2010), Colombia cuenta con un notable potencial de biomasa residual, derivado de diversos cultivos agrícolas que generan residuos de alto valor energético. Según datos recopilados, el país produce anualmente alrededor de 14.974.347 toneladas de biomasa residual, con un potencial energético estimado de 331.638,7 TJ/año. Entre los cultivos más destacados por su volumen de producción y capacidad energética (Tabla 2) se encuentran la caña de azúcar, la caña panelera y la palma de aceite, siendo estos los principales contribuyentes al aprovechamiento de biomasa para biorrefinerías.

Tabla 2*Poder calórico inferior para biomasa residual en Colombia*

Sector	Fuente de biomasa	Tipo residuo	PCI [Kcal/kg]
Agrícola	Palma de aceite	Cuesco	3.988
		Fibra	4.274
		Raquis	4.021
	Caña de azúcar	Rac	3.684
		Bagazo	4.456
	Caña para panela	Hojas secas	4.007
		Rac	3.684
Café		Pulpa	4.259
		Cisco	4.430
		Tallos	4.384
Maíz		Rastrojo	3.429
		Tusa	3.390
		Capacho	3.815
		Hojas secas	4.274
Arroz		Tamo	3.113
		Cascarilla	3.603
Banano		Raquis	1.809
		Vástago	2.032
		Rechazo	2.488
Plátano		Raquis	1.808
		Vástagos	2.032

Nota. Adaptado de (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2010)

La caña de azúcar es el cultivo con mayor potencial, con residuos como hojas, cogollos y bagazo, que generan aproximadamente 15.534.591 toneladas de residuos anuales y un potencial energético total de 114.579,96 TJ/año. Este cultivo representa una fuente estratégica para bioenergía, debido a su abundancia y la viabilidad de sus subproductos.

Por su parte, la palma de aceite, otro de los cultivos principales, genera residuos como el cuesco, la fibra y el raquis de palma, alcanzando una producción total de 1.660.075 toneladas de residuos con un potencial energético de 15.986,12 TJ/año. Este cultivo no solo es significativo por la cantidad de biomasa generada, sino también por su papel en la producción de biodiesel, consolidándose como una fuente clave en la bioeconomía nacional.

El arroz, que ocupa el tercer lugar en relevancia, genera subproductos como la cascarilla y el tamo, con una producción anual de 6.282.427 toneladas de residuos y un potencial energético de 27.836,36 TJ/año. La cascarilla de arroz, en particular, es un residuo de gran interés debido a su balance favorable entre celulosa y lignina, y su bajo contenido de humedad, características que la hacen especialmente adecuada para procesos de bioconversión.

Otros cultivos como el café, el maíz, el banano y el plátano también aportan significativamente a la disponibilidad de biomasa residual en Colombia. Por ejemplo, el café genera aproximadamente 3.022.477 toneladas de residuos al año, con un potencial energético de 51.105,70 TJ/año, mientras que el maíz contribuye con 2.336.735 toneladas de residuos y un potencial energético de 20.796,86 TJ/año. Estos cultivos diversifican las oportunidades de aprovechamiento de biomasa en diferentes regiones del país.

El análisis de las características de los residuos muestra que algunos, como las hojas, tallos y maleza, tienen un contenido de humedad superior al 55 %, siendo aptos para bioconversión en procesos de digestión anaerobia o compostaje. Otros residuos, como la cascarilla de arroz y el polvo de granos secos, presentan un bajo contenido de humedad (menor al 25 %), lo que los hace ideales para procesos térmicos o químicos, maximizando su aprovechamiento energético.

5.6 Biomasa residual agrícola

Son los residuos agrícolas y aquellos materiales generados en los cultivos de distintas especies que no poseen valor económico. Entre ellos se encuentran la paja de los cereales, los restos de las cosechas hortícolas, los restos de las podas, los vástagos y raquis de los bananos, el cuesco del maíz entre muchos otros. Una parte de estos residuos se dejan en el campo por motivos medioambientales, para incrementar su fertilidad y evitar la erosión (Alday et al., 2012).

5.7 Biorrefinerías: definición y topologías

Las biorrefinerías son instalaciones que integran diversos procesos y tecnologías de conversión para transformar la biomasa en una gama de productos que incluyen combustibles, energía y productos químicos. Estas instalaciones buscan, al igual que las refinerías de petróleo, maximizar el valor de la biomasa y minimizar los residuos generados en el proceso (Cherubini, 2010). Las investigaciones indican que las biorrefinerías pueden utilizar diversas materias primas, como residuos agrícolas, subproductos forestales e incluso residuos municipales, para producir energía renovable y bioproductos de alto valor (Zhu et al., 2023). Las biorrefinerías representan un pilar fundamental en la transición hacia una bioeconomía sostenible (John et al., 2010), donde se aprovechan los recursos biológicos renovables para sustituir materiales y energía de origen fósil (Gobert, 2019).

Las biorrefinerías se pueden clasificar según el tipo de biomasa utilizada, los productos obtenidos y las tecnologías de conversión aplicadas. Kamm y Kamm (2004) identifican dos principales generaciones de biorrefinerías: las de primera generación, que utilizan biomasa como materia prima, y las de segunda generación, que emplean residuos lignocelulósicos y no compiten con la producción de alimentos. Por otro lado (Goswami et al., 2022), explican que según sus niveles de integración y flexibilidad, las biorrefinerías se nombran como de primera, segunda y tercera generación. Una biorrefinería de tercera generación aprovecha todas las posibilidades que ofrece la biomasa, reduciendo la generación de residuos. Otras sistemas de clasificación se basan en la materia prima empleada o el tipo de procesamiento de la misma (Cherubini, 2010), como se muestra en la Figura 2.

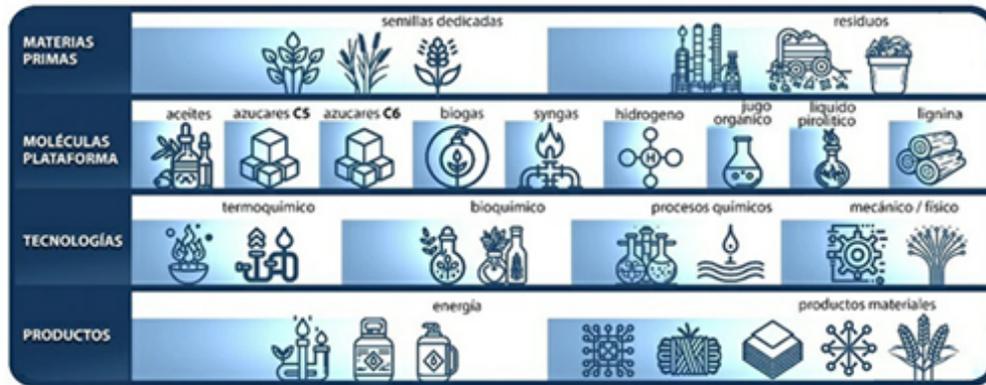
En Colombia, la atención se ha centrado en las biorrefinerías que procesan biomasa residual, destacándose por su potencial para aprovechar residuos agrícolas, forestales y municipales, lo que ofrece una solución para la gestión de residuos y la producción de bioproductos. Por ejemplo, Sanchita y Mira (2024) destacan la importancia de integrar las biorrefinerías en las economías locales para optimizar el uso de los recursos y promover los principios de la economía circular.

5.8 Cadena de suministro de la biomasa (BSC)

La cadena de suministro de biomasa (BSC) es un sistema lógico complicado compuesto por múltiples actividades (Aalto et al., 2019). Esta se caracteriza por contar con un gran número de fuentes potenciales y un número significativo de partes interesadas (Rentizelas,

Figura 2

Elementos relativos a la operación de una biorrefinería



Nota. Adaptado de (Cherubini, 2010).

2013), estas presentan variaciones espaciales en lo que respecta, por ejemplo, a la distribución de los lugares de generación de materia prima, la ubicación de las distintas operaciones y las largas distancias de transporte (Aalto et al., 2019).

En Colombia la BSC representa un sistema que engloba diversas actividades clave como el cultivo, la cosecha, el transporte, el preprocesamiento, el almacenamiento y la conversión energética. Esta cadena desempeña un papel crucial en la transición hacia un sistema energético más sostenible, especialmente en un país con un alto potencial de biomasa proveniente de residuos agrícolas y forestales (Ogunrewo y Nwulu, 2024; Aslani et al., 2024).

Estas actividades conforman un eslabón importante de la cadena, por ejemplo, la primera etapa, la cosecha y recolección, es crítica para garantizar un suministro constante de biomasa. Este proceso se realiza en períodos específicos mediante maquinaria como cosechadoras, aunque se pueden perder entre el 10 % y el 20 % de la biomasa debido a limitaciones en la recolección y manipulación (Gómez Quiceno et al., 2022). En Colombia, la disponibilidad de residuos agrícolas, como la cascarilla de arroz y los residuos de banano, constituyen una fuente significativa de biomasa para este propósito Aslani et al. (2024).

Por otro lado, el almacenamiento es un proceso que al poder darse en distintos puntos de la BSC pueden proporcionar estabilidad del suministro frente a fluctuaciones temporales

en la generación de biomasa. Este ofrece ventajas como la reducción del contenido de humedad, sin embargo, puede aumentar los costos de la cadena (Lautala et al., 2015). En este proceso, la materia prima puede ser conservada en almacenes específicos, en el campo o en las instalaciones de conversión, según las necesidades de cada proyecto (Dokl et al., 2024).

En el contexto colombiano, el almacenamiento también permite una mejor planificación de la logística, mitigando los desafíos que surgen debido a la naturaleza estacional de los cultivos (Wang et al., 2024). La estacionalidad de los cultivos determina la disponibilidad temporal de la materia prima, es decir, permite identificar en que tiempos específicos del año esta es cosechada. Esto permite planificar la cosecha en los mejores momentos, optimizando el rendimiento y la logística, pero también implica almacenar biomasa por más tiempo, lo que puede aumentar costos y riesgos de deterioro (Ogunrewo y Nwulu, 2024).

El preprocesamiento en nuestro caso incluye actividades como el secado, la peletización y el empaclado, diseñadas para optimizar la manipulación y la eficiencia de la biomasa durante las etapas posteriores. Estas actividades pueden realizarse directamente en el campo con herramientas simples, o en sitios especializados que disponen de equipos más avanzados (Dokl et al., 2024). Por ejemplo, la peletización no solo mejora la densidad energética del material, sino que también facilita su transporte y almacenamiento (Chidozie et al., 2024).

La logística y el transporte constituyen otro aspecto fundamental en la BSC. En la actualidad el proceso, a menudo es costoso, es por esto requiere una planificación estratégica de rutas y recursos para minimizar gastos y emisiones de GEI (Wang et al., 2024). El uso de distintos medios de transporte, como camiones o trenes, puede reducir costos, pero esto depende de factores como las características de las materias primas, su origen, destino y la infraestructura disponible en la zona (Lautala et al., 2015). Hay que tener en cuenta que los costos de transporte varían según las distancias, las cantidades manejadas, los medios utilizados y las rutas.

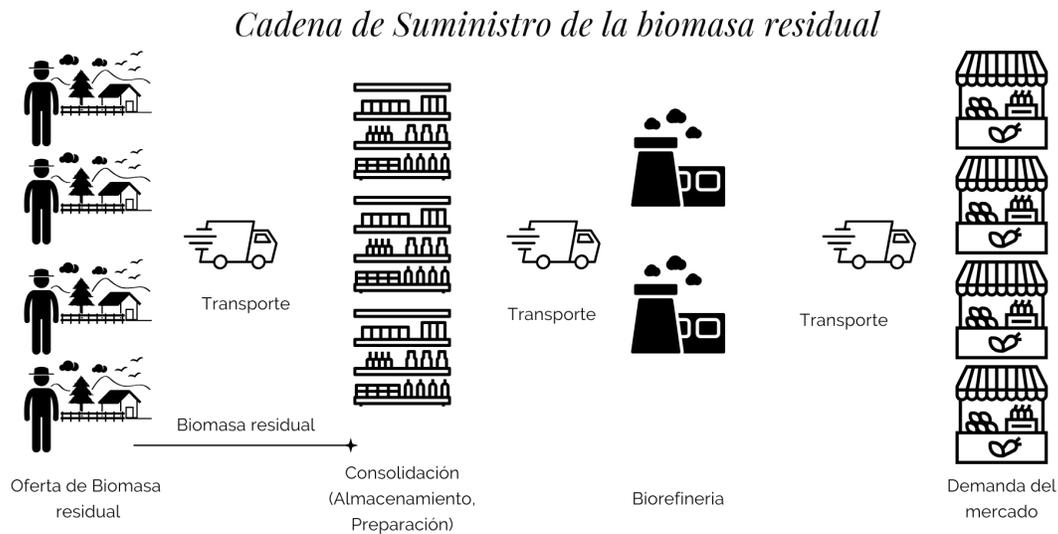
En Colombia, donde el transporte por carretera es predominante, la utilización de camiones es una solución eficiente para conectar áreas rurales con centros de conversión, aunque esto plantea desafíos logísticos debido a la limitada infraestructura vial en algunas regiones (Chidozie et al., 2024).

Por último, en la etapa de conversión energética, la biomasa recolectada se transforma en productos útiles, como electricidad, calor o biocombustibles. En Colombia, los proyectos de biomasa tienen un gran potencial para suplir las necesidades energéticas de comunidades rurales, particularmente mediante tecnologías como la gasificación o la generación de biogás

(Dokl et al., 2024). Los flujos de la BSC antes mencionados se pueden identificar en la Figura 3.

Figura 3

Cadena de suministro de la biomasa energética



Nota. Fuente (Lo et al., 2021)

A pesar de su gran potencial, la cadena de suministro de biomasa enfrenta desafíos significativos, como las fluctuaciones del mercado, las limitaciones en la disponibilidad de maquinaria y los impactos de las condiciones climáticas (Ogunrewo y Nwulu, 2024). Además, factores como la falta de infraestructura adecuada y la necesidad de inversión en tecnologías avanzadas limitan el desarrollo óptimo de esta cadena en Colombia (Aslani et al., 2024).

5.9 Quema de biomasa

La quema de biomasa se divide en seis tipos: quema al aire libre, quema de residuos agrícolas, asados de carne y pescado, estufas y calderas de leña, hornos y quemadores de carbón. La quema de biomasa se caracteriza en gran medida por una combustión incompleta debido a la dificultad de un control adecuado, lo que da como resultado la emisión de una gran cantidad de contaminantes del aire y la generación de sustancias nocivas como compuestos

orgánicos volátiles (Kim et al., 2021).

5.10 Modelo de optimización en la planificación de localización

La optimización es una técnica matemática utilizada para encontrar la mejor solución dentro de un conjunto de posibles alternativas, considerando ciertas restricciones y criterios. En el contexto de la localización de instalaciones industriales, los modelos de optimización son herramientas esenciales que permiten identificar ubicaciones que minimicen costos y maximicen beneficios, teniendo en cuenta múltiples factores y restricciones (Saldanha-da Gama, 2022). Estos modelos son especialmente valiosos en la toma de decisiones estratégicas, donde se busca equilibrar eficiencia y sostenibilidad.

5.11 Modelos multiobjetivo

Los modelos de optimización multiobjetivo son aquellos que consideran simultáneamente varios objetivos, los cuales pueden estar en conflicto entre sí. Estos modelos son particularmente útiles en problemas de localización de biorrefinerías, ya que permiten integrar aspectos económicos, ambientales y sociales en la toma de decisiones (Beeramoole et al., 2024). La optimización multiobjetivo permite encontrar soluciones que representen compromisos óptimos entre los diferentes objetivos, lo cual es esencial para la sostenibilidad a largo plazo.

5.12 Aplicación de modelos de optimización en la localización de biorrefinerías

La localización de biorrefinerías es un problema complejo que implica considerar la disponibilidad de biomasa, costos de transporte, impactos ambientales y aceptación social. Diversos estudios han aplicado modelos de optimización multiobjetivo para abordar estos problemas, utilizando técnicas como la programación lineal, algoritmos evolutivos y métodos de decisión multicriterio (Giarola et al., 2011). Sin embargo, en Colombia, el desarrollo y la aplicación de estos modelos aún se encuentra en una etapa inicial, lo que subraya la relevancia de esta investigación para el avance del sector bioindustrial en el país (Cardona et al., 2023).

La validación es una técnica que permite evaluar el comportamiento de un modelo bajo diversas condiciones, lo cual es fundamental para su adecuada utilización como herramienta

en la toma de decisiones. En el contexto de la localización de biorrefinerías, la validación ayuda a prever los impactos de diferentes decisiones y a mejorar la robustez del modelo desarrollado (Sbarciog et al., 2022). Esta técnica es particularmente útil para analizar escenarios futuros y para ajustar el modelo a las realidades específicas del entorno en el que se aplicará.

6 Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados en esta propuesta, se adoptó una metodología con un enfoque mixto que integró tanto métodos cualitativos, entre ellos la revisión y recopilación de estudios bibliográficos, el análisis de políticas ambientales y la evaluación de criterios logísticos para la localización de biorrefinerías, como cuantitativos, a través del desarrollo de un modelo de optimización. Este permitió recopilar y analizar datos de fuentes oficiales como la UPME y otros entes del gobierno colombiano. Además, se revisaron artículos científicos y textos especializados en programación matemática e investigación de operaciones para diseñar el modelo. El enfoque cuantitativo en el estudio fue primordial para el desarrollo y validación del modelo de optimización. Se utilizaron técnicas estadísticas y matemáticas para analizar datos matemáticos y de información relacionados con la disponibilidad, características y localización de biomasa residual, así como para modelar y simular diferentes escenarios de localización de biorrefinerías. Por otro lado, el enfoque cualitativo complementó el análisis cuantitativo mediante la recolección y análisis de información cualitativa relevante para el estudio. Se llevaron a cabo entrevistas con expertos del sector, cuando fue necesario, y se realizó un análisis documental y estudios de casos que permitieron contextualizar los resultados del modelo de optimización, considerando aspectos sociales y ambientales que no siempre pudieron ser capturados mediante métodos cuantitativos.

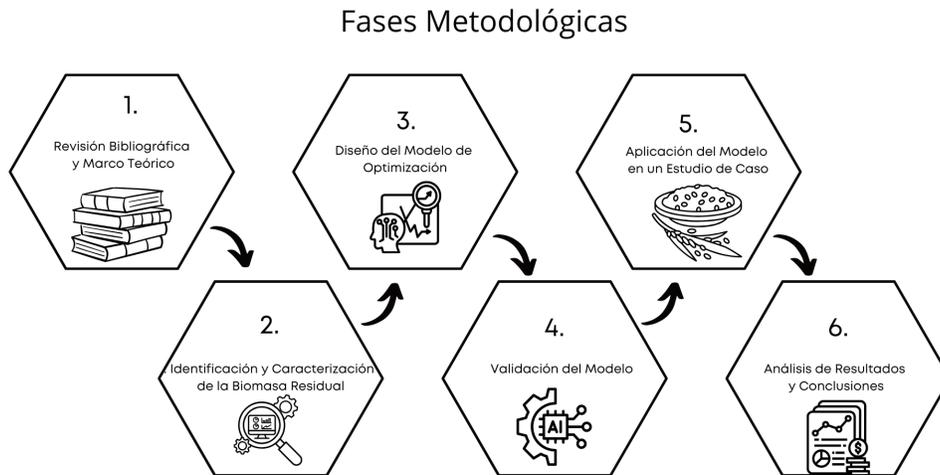
6.1 Técnicas e instrumentos

Se emplearon diversas técnicas para recopilar y analizar datos, modelar el problema y validar los resultados. Se realizó un análisis documental a partir de bases de datos científicas y gubernamentales para obtener información sobre biomasa residual y metodologías de optimización. El modelo de optimización fue desarrollado en Python, permitiendo evaluar diferentes escenarios. Además, se aplicó un estudio de caso en una región específica para validar la viabilidad del modelo.

Para facilitar la comprensión del procedimiento, se elaboró la Figura 4 en la que se muestra el diagrama de flujo del procedimiento metodológico utilizado.

Figura 4

Diagrama de flujo de la metodología



Nota. Adaptado de (Chidozie et al., 2024).

6.2 FASES

6.2.1 Fase 1: Revisión bibliográfica y marco teórico

Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura para establecer el marco teórico del estudio. Se analizaron fuentes secundarias destacadas como Scopus, ScienceDirect, Springer, Google Académico y SciELO, además de datos oficiales de la UPME, el DANE y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). La revisión permitió comprender el estado del arte en la localización de biorrefinerías, el uso de biomasa residual y las metodologías de optimización multiobjetivo. Esta incluyó estudios previos, teorías relevantes y casos de éxito que proporcionaron las bases conceptuales y técnicas necesarias para el desarrollo del modelo propuesto.

6.2.2 Fase 2: Identificación y caracterización de la biomasa residual

Una vez establecido el marco teórico, se identificó y caracterizó una fuente de biomasa residual en Colombia con potencial para la producción de bioproductos. Esta etapa incluyó

la recopilación y análisis de datos sobre localización geográfica, volumen de producción y características técnicas de la biomasa seleccionada. Se utilizaron tanto fuentes primarias como secundarias, incluyendo bases de datos gubernamentales, estudios académicos y reportes técnicos, para garantizar la viabilidad de la biomasa seleccionada para su uso en biorrefinerías.

6.2.3 Fase 3: Diseño del modelo de optimización

A partir de la información recopilada, se diseñó un modelo de optimización que integró los diversos criterios planteados. El modelo fue desarrollado utilizando Python como lenguaje de programación, empleando la librería Pyomo para su formulación y se resolvió mediante el solucionador CBC. Además, se definieron y simuló escenarios para evaluar la factibilidad del modelo, considerando restricciones de transporte, costos de operación y emisiones evitadas.

6.2.4 Fase 4: Validación del modelo

Una vez desarrollado el modelo de optimización, se procedió a ser validado mediante su ejecución en diversos escenarios. En esta etapa, se realizaron ajustes a los parámetros y criterios según los resultados obtenidos, evaluando la robustez y aplicabilidad del modelo en el contexto colombiano. Se analizaron métricas como costos totales, eficiencia en el transporte y emisiones de CO_2 para verificar la aplicabilidad del modelo.

6.2.5 Fase 5: Aplicación del modelo en un estudio de caso

En esta fase, se aplicó el modelo en un caso de estudio en Colombia, seleccionando la cascarilla de arroz como fuente de biomasa residual. Este estudio permitió evaluar su potencial para la producción de bioproductos y su efectividad para identificar ubicaciones óptimas de biorrefinerías. También se generaron estrategias de implementación basadas en los resultados obtenidos, lo que aportó un enfoque práctico al estudio.

6.2.6 Fase 6: Análisis de resultados y conclusiones

Finalmente, se realizó un análisis exhaustivo de los resultados del estudio de caso, integrando los hallazgos cuantitativos y cualitativos. Se discutieron las implicaciones del modelo para la planificación estratégica de biorrefinerías en Colombia, incluyendo recomendaciones para mejorar la logística de suministro de biomasa residual. Además se formularon sugerencias para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

7 Estudio de caso: cascarilla de arroz

A nivel global, se estima que cerca de una tercera parte de los alimentos producidos para consumo humano son desechados, lo que genera grandes cantidades de residuos en todas las etapas de la cadena productiva, desde el cultivo hasta la comercialización (Gómez Quiçeno et al., 2022). Estos desechos agrícolas, en su mayoría, se descomponen emitiendo gases de efecto invernadero (GEI) como metano (CH_4) y lixiviados, o son incinerados, liberando dióxido de carbono (CO_2) y otros contaminantes atmosféricos (Asim et al., 2015).

En este contexto, la producción de residuos agrícolas a nivel mundial alcanza aproximadamente 140 mil millones de toneladas al año (Nwajiaku et al., 2018). A pesar de su potencial para diversos usos, muchos de estos residuos no son considerados materiales reciclables ni aprovechables, perpetuando un modelo económico lineal que promueve su disposición inadecuada (Castro-Garzón et al., 2020).

El arroz es el segundo alimento más consumido en todo el mundo, con una demanda global anual de aproximadamente 471 millones de toneladas (Fernandes et al., 2016) y un consumo per cápita de arroz en Colombia de alrededor de 46 kilos (Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ), 2024). Dentro de este panorama, el arroz se destaca como un cultivo esencial, con una producción global de aproximadamente 770 millones de toneladas anuales. Este grano es especialmente adecuado para su cultivo en tierras con alta capacidad de retención de agua y contenido orgánico, como las tierras grises, negras y lateríticas (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2025). Durante su procesamiento, se genera un subproducto significativo: la cascarilla de arroz, la cual posee un gran potencial para aplicaciones en bioenergía, construcción y suplementos nutricionales, aunque sigue infrutilizada en muchas regiones del mundo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2018).

En Colombia, la diversidad climática y geográfica facilita una notable actividad agropecuaria. Aproximadamente el 44,77 % del territorio colombiano está destinado a actividades agropecuarias, con más de 4 millones de hectáreas dedicadas a cultivos permanentes y transitorios como arroz, café, palma de aceite y caña de azúcar (UPME, 2010). En 2019, la producción agrícola nacional alcanzó los 63,2 millones de toneladas, destacándose la caña de azúcar (23 millones de toneladas), la caña panelera (11 millones) y los racimos de fruta de palma de aceite (6,6 millones). Dentro de los cultivos transitorios, el arroz contribuyó con 1,9 millones de toneladas, consolidándose como uno de los más importantes del país (DANE, 2020; Rodríguez et al., 2023). A nivel mundial, se estima que la producción de residuos agrícolas alcanza los 140 mil millones de toneladas al año (Nwajiaku et al., 2018).

7.1 Origen, Composición y Potencial de Aprovechamiento

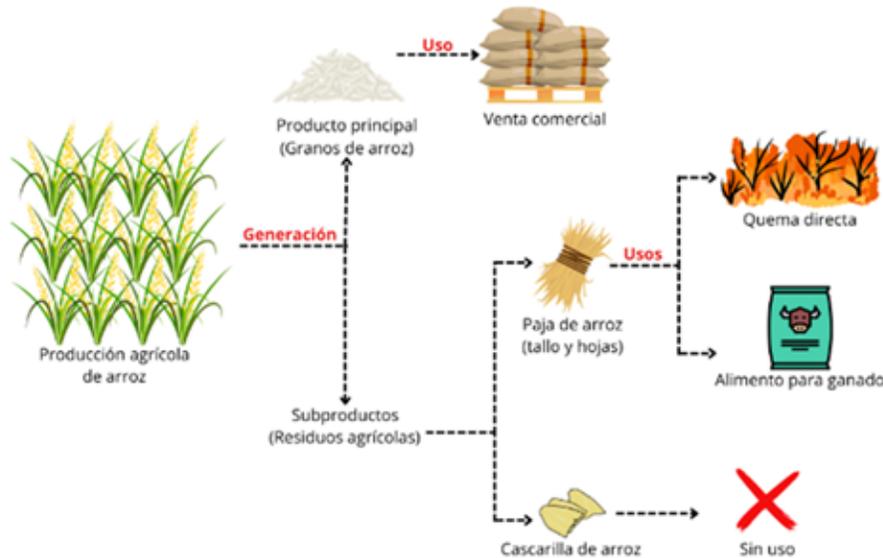
Colombia es el segundo productor de arroz en América Latina y el Caribe, con un estimado de 6 millones de toneladas de cascarilla generadas anualmente. Este subproducto es un residuo agrícola considerado subproducto del procesamiento del arroz, generado específicamente en los molinos donde se separa la cáscara del grano. Este material representa un 25 % del peso total del grano, lo que lo convierte en un recurso estratégico para la bioeconomía (Alvarado et al., 2013). A continuación, se describe el proceso de cultivo y producción del arroz, junto con la obtención de los subproductos derivados y los posibles destinos que estos pueden tener, como se ilustra en la Figura 5.

Los residuos agrícolas, como hojas, raíces y tallos, son elementos no aprovechados derivados de la cosecha de productos principales. Sin embargo, en la imagen sobre la generación de productos y sus usos, se destacan los granos de arroz como producto principal, destinados a la venta directa o como materia prima para otros procesos. Por otro lado, los subproductos, como la cascarilla de arroz, presentan desafíos para su aprovechamiento debido a su alto contenido de sílice (SiO_2), lo que limita sus aplicaciones en comparación con la paja de arroz.

La cascarilla de arroz tiene funciones protectoras esenciales para el grano, protege mecánicamente al mismo y previene la pérdida de agua, ya que actúa como una barrera mecánica y evita la pérdida de humedad. Su composición química incluye celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que la clasifica como un residuo lignocelulósico (Kordi et al., 2024). En la Figura 6 se muestran los componentes del arroz palay, que incluye el grano aún cubierto por la cascarilla, la cual se genera como subproducto en los molinos de arroz (Bazuhair, 2023).

Figura 5

Generación de productos y sus usos, a través de la producción agrícola del arroz.

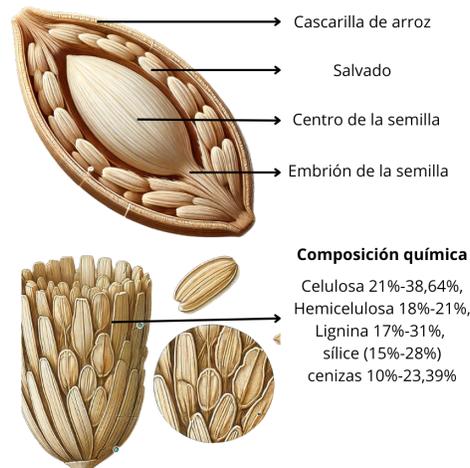


Nota. Fuente (Rodríguez et al., 2024).

En el caso de la cascarilla de arroz, su composición lignocelulósica presenta niveles de celulosa que oscilan entre el 21 %-38,64 %, hemicelulosa del 18 %-21 %, y lignina del 17 %-31 %, además de un contenido significativo de sílice (15 %-28 %) y cenizas (10 %-23,39 %) (Malik et al., 2024; Hincapié Rojas et al., 2024; Bisht y Rani, 2024). Estas características la convierten en un material prometedor para la producción de biocombustibles avanzados, como bioetanol y biodiésel, así como bioproductos de alto valor agregado, como bioplásticos, bioadsorbentes y materiales de construcción. La presencia de sílice, en particular, la hace útil para fabricar cemento y otros materiales compuestos, mientras que su contenido de lignina permite desarrollar adhesivos, resinas y productos químicos aromáticos (Karimi et al., 2006).

Además, está compuesta por un 80 % de compuestos orgánicos y un 20 % de inorgánicos, entre los que destacan minerales como magnesio, sodio, hierro y silicio. Su característica más distintiva es su elevado contenido de sílice (SiO_2), que representa entre el 87 % y el 97 % de los compuestos inorgánicos (Nzereogu et al., 2023).

Esta alta concentración de sílice confiere propiedades únicas, como resistencia al fuego e incapacidad para ser digerido por animales, lo que limita su manejo convencional. Sin embargo, dicha característica también abre oportunidades para su aprovechamiento mediante

Figura 6*Componentes del arroz palay.*

Nota. Fuente (Malik et al., 2024; Hincapié Rojas et al., 2024; Rodriguez et al., 2024).

procesos termoquímicos, como la carbonización hidrotérmica, obteniendo productos como hidrochar y biocombustibles (Rodriguez et al., 2024).

7.2 Procesos de valorización de la cascarilla de arroz en bioproductos

Hasta la década de 1990, prácticamente toda la cascarilla de arroz producida se esparcía en tierras agrícolas o se eliminaba de manera inadecuada en los lechos de los ríos, generando graves impactos ambientales. Sin embargo, las crecientes preocupaciones ambientales han restringido la eliminación no controlada de cascarilla o su quema a cielo abierto. Este cambio, junto con las preocupaciones sobre la dependencia de los combustibles fósiles y el cambio climático, ha incentivado el desarrollo de alternativas de mayor valor agregado para la reutilización de la cascarilla, integrándola en la producción de biomasa, energía renovable y bioproductos industriales (Fernandes et al., 2016).

La cascarilla de arroz, al igual que otras biomásas lignocelulósicas, tiene un gran potencial para la producción de biocombustibles y bioproductos gracias a su composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa y la hemicelulosa permiten la generación

de azúcares simples mediante procesos como la hidrólisis, esenciales para la obtención de bioetanol y otros productos derivados. Sin embargo, la estructura compacta de la pared celular, caracterizada por los enlaces entre hemicelulosa y lignina, puede limitar la eficiencia de los procesos de conversión.

Además de los biocombustibles, la cascarilla de arroz tiene aplicaciones versátiles en la producción de bioadsorbentes utilizados para la remoción de metales pesados en aguas residuales, fertilizantes enriquecidos y suplementos nutricionales, gracias a su contenido de fibra (25,74 %) y proteína cruda (1,85 %) (Nnadiukwu et al., 2023). También se emplea como materia prima en la fabricación de biopolímeros y nanoestructuras de carbono, fortaleciendo su papel en la bioeconomía global.

En términos energéticos, la cascarilla de arroz generada en Colombia tiene un potencial de 27.836,36 TJ/año, lo que resalta su capacidad para apoyar la transición energética del país. Su aprovechamiento no solo permitiría reducir emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano generado por su descomposición, sino que también promovería una economía circular basada en el uso sostenible de residuos agrícolas (IDEAM, 2021).

Si hablamos de su valorización, esta depende de las características físicas y químicas previamente mencionadas, así como de las aplicaciones requeridas y los recursos disponibles. Entre los procesos más destacados para la transformación de cascarilla de arroz identificados por Rodríguez et al. (2024) se encuentran los biológicos, como la fermentación y la digestión anaerobia, que convierten residuos orgánicos en bioetanol y biogás, ofreciendo alternativas energéticas sostenibles que contribuyen a reducir el uso de combustibles fósiles (Asim et al., 2015; Castro-Garzón et al., 2020). En el ámbito químico y térmico, procesos como la hidrólisis y la calcinación transforman residuos lignocelulósicos en endulzantes y cenizas ricas en minerales, con aplicaciones en la mejora de suelos y la construcción (Nzereogu et al., 2023; Abe et al., 2023).

Los procesos termoquímicos como la gasificación, pirólisis y carbonización hidrotérmica permiten obtener biogás, biochar, hidrochar y otros biocombustibles. En particular, el biochar es altamente valorado por su capacidad de mejorar la fertilidad del suelo y la adsorción de contaminantes. Además, de la cascarilla de arroz también pueden obtenerse nanoporosa de sílice (NPS), que tienen aplicaciones en la industria de materiales avanzados y la nanotecnología debido a sus propiedades únicas. Los productos antes mencionados son útiles para la generación de energía, la adsorción de contaminantes y la mejora de suelos. El biochar y el hidrochar destacan por su capacidad de almacenamiento energético y potencial

en la remediación ambiental apoyando a una economía más sostenible. (Li et al., 2021; Kordi et al., 2024; Bazuhair, 2023).

8 Modelo de optimización multiobjetivo

Teniendo en cuenta la cadena de suministro evidenciada en la Figura 4, que consta de puntos de origen, puntos de acopio (almacenamiento y preprocesamiento), biorrefinerías, mercados y transporte, se diseñó el siguiente modelo de optimización. Esto con el fin de encontrar una solución óptima que equilibre los componentes económicos, ambientales y sociales que intervienen en la cadena. Este modelo busca integrar cada uno de estos elementos y proporcionar un equilibrio entre costos, sostenibilidad ambiental y beneficios sociales. A través del modelo, se analizarán de manera integrada aspectos clave como:

- La ubicación óptima de las plantas de procesamiento y los puntos de acopio.
- La selección eficiente de los puntos de acopio de biomasa residual.
- El transporte y manejo de biomasa para minimizar costos y emisiones.
- La generación de beneficios económicos mediante la venta de bioproductos y el aprovechamiento de incentivos por emisiones evitadas.
- El impacto social, como la generación de empleo en las diferentes etapas de la cadena.

8.1 Conjuntos

Ahora bien, para empezar con la construcción del modelo se definen los siguientes conjuntos fundamentales:

- **I**: Conjunto de ubicaciones de origen donde se recolecta la biomasa residual.
- **L**: Conjunto de ubicaciones potenciales para puntos de acopio (almacenamiento intermedio de biomasa y acondicionamiento posterior para su uso en otro lugar).
- **J**: Conjunto de ubicaciones potenciales para instalar biorrefinerías.
- **B**: Conjunto de tipos de bioproductos.
- **T**: Conjunto de tipos de biorrefinerías potenciales a implementar.

8.2 Variable de decisión

El modelo considera una única forma de adquirir biomasa residual, este es directamente en los molinos en donde se encuentra, luego esta debe dirigirse a un punto de acopio para ser preprocesados y almacenados. Una vez en los puntos de acopio, la biomasa debe ser transportada hacia la biorrefinería. En la biorrefinería se debe decidir que tecnología se va a usar y con ella, el producto a realizar. Es importante aclarar que en este modelo estamos definiendo rutas únicas por tecnología, es decir, una tecnología realiza un bioproducto, sin embargo, en investigaciones futuras pueden considerarse configuraciones más complejas en las cuales una tecnología pueda producir varios bioproductos.

El modelo incluye costos de almacenamiento, tratamiento y decisiones sobre la apertura de biorrefinerías y puntos de acopio, transporte de biomasa, producción de bioproductos y su distribución, buscando optimizar costos, emisiones de CO_2 y sostenibilidad en la cadena de suministro, por eso es importante decidir:

- \mathbf{x}_j : Variable que indica si se construye una biorrefinería en la ubicación j (Binaria, 1 si se construye, 0 si no).
- \mathbf{v}_l : Variable que indica si se abre un punto de acopio en la ubicación l (Binaria, 1 si se construye, 0 si no).
- \mathbf{y}_{il} : Cantidad de biomasa transportada desde la ubicación de origen i al punto de acopio en la ubicación l (Toneladas de biomasa).
- \mathbf{z}_{lj} : Cantidad de biomasa transportada desde la ubicación del punto de acopio l a la biorrefinería j (Toneladas de biomasa).
- \mathbf{u}_{jb} : Cantidad de bioproducto b producido en la biorrefinería en la ubicación j (Capacidad) (Toneladas).
- \mathbf{r}_{jt} : Variable binaria que indica si en la biorrefinería j ubicada se utiliza la tecnología t (1 si se elige la tecnología t , 0 si no). Tecnología del tipo biorrefinería (define el tipo de productos).

8.3 Parámetros

8.3.1 Cantidad de biomasa

Para este es importante resaltar que se debe contabilizar de manera adecuada las cantidades de biomasa correspondientes en cada ubicación de origen, por ello se definen los siguientes parámetros:

- P_i : Cantidad de biomasa disponible en la ubicación i .
- CP_j : Capacidad de procesamiento de biomasa de la biorrefinería en la ubicación j , dependiendo de la tecnología usada.
- α_{tb} : Proporción de la biomasa procesada que se transforma en bioproducto b según la tecnología t .

8.3.2 Económicos

En estos se deben tener en cuenta todos los ingresos asociados a las ventas u otros y los costos correspondientes, incluyendo los de compra de biomasa en el punto de origen. Tal y como se muestra a continuación:

- IV_b : Ingresos (Precio por unidad del bioproducto) por venta de productos por cada bioproducto b .
- IVE : ingresos por emisiones evitadas.
- F_{jt} : Costo de operación de la biorrefinería de tipo t en la ubicación j .
- C_{compra_i} : Costos asociados a la compra de la biomasa residual.
- CA_l : Costos fijos del punto de acopio en la ubicación l
- G_l : Costos de operación del punto de acopio en la ubicación l por tonelada procesada.
- $Costo_t$: Costos de implementar una biorrefinería de la tecnología t .

En este ejercicio, los costos de operación están relacionados con el almacenamiento y el preprocesamiento de la biomasa. Debido a la dificultad de definir con precisión la cadena de abastecimiento interna, se asumió que toda la biomasa que ingrese al punto de acopio tendrá asociados estos costos.

Para establecer este costo, se asume que la demanda en las biorrefinerías será constante, lo que garantiza que toda la biomasa procesada será vendida. Por lo tanto, el costo de operación del punto de acopio estará determinado por el volumen de biomasa manejado, el costo promedio por metro cuadrado anual de almacenamiento, la altura máxima permitida en la bodega y el costo de mantener las operaciones en el acopio.

Por eso, el costo va a estar dado por (USD/TON):

$$G_l = \frac{CM_i}{AM} \cdot (CA) \cdot vol$$

CM_i = costos por metro cuadrado anual promedio en bodega en la región i .

AM = Altura máxima para apilar la materia prima.

CA = Costo anual de operación dentro del acopio.

vol = Volumen específico de la biomasa residual en m^3/ton

8.3.3 Transporte

En estos es importante destacar que el costo de transporte depende de la distancia, las toneladas transportadas y un factor regional, representado en una matriz que combina distancias entre regiones y un parámetro ajustado.

- D_{il} , D_{lj} : Matriz de distancia entre ubicaciones, el punto de origen i , el punto de acopio l y la biorrefinería j .
- CTE : Costos de transporte por ton y kim recorrido ($\frac{USD}{km \cdot ton}$)

8.3.4 Ambientales

La selección de la cantidad de biomasa a aprovechar y a transportar va a estar limitada por el factor de emisión de cada operación, específicamente por las que se utilizan y las que se evitan. En el estudio todo se mide en CO_2 equivalente debido a que el CO_2 es el gas de efecto invernadero que mas se mantiene y este representa en promedio más del 95 % del impacto en el cambio climático que proviene de la quema de combustibles (González Velasco et al., 2023), por esto los factores de emisión están definidos así:

- **ECO2_T**: Factor de emisiones de CO_2 por tonelada de biomasa transportada.
- **ECO2_O**: Factor de emisiones de CO_2 generadas en las operaciones de la biorrefinería.
- **ECO2_{OPENA}**: Factor de emisiones de CO_2 generadas en las operaciones de acopio por tonelada procesada.
- **ECO2_{evitadas_i}**: Factor de emisiones de CO_2 equivalente evitadas al aprovechar la biomasa en el sitio i .
- **ECO2_{evitadas_b}**: Factor de emisiones de CO_2 equivalente evitadas por sustituir productos con b .

8.3.5 Sociales

Para abordar el factor social, es fundamental definir cómo se beneficiará a las comunidades en las zonas seleccionadas. Para ello, se establecen parámetros relacionados con la generación de empleo, garantizando un mínimo de puestos de trabajo que asegure un impacto positivo en el bienestar de las personas. Por esta razón, se establecen los siguientes:

- **W_t**: Número de empleos generados si se usa la tecnología t .
- **W_{OPENA_l}**: Número de empleos generados en el punto de acopio l .
- **W_{min}**: Número de empleos mínimos que se deben generar en la operación.

8.4 Función objetivo

El objetivo del modelo de optimización es maximizar los beneficios totales de la cadena (Ingresos totales - los costos operativos totales)

$$\begin{aligned}
 \text{Maximizar } Z = & \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} (IV_b \cdot u_{jb}) \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (IVE \cdot \text{ECO2}_{\text{evitadas}_i} \cdot y_{il}) \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} (IVE \cdot \text{ECO2}_{\text{evitadas}_b} \cdot u_{jb}) \\
 & - \left[\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \text{CTE} \cdot (D_{il} \cdot y_{il}) \right. \\
 & + \sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \text{CTE} \cdot (D_{lj} \cdot z_{lj}) \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} (F_{jt} \cdot u_{jb}) \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (G_l \cdot y_{il}) \\
 & + \sum_{l \in L} (\text{CA}_l \cdot v_l) \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (\text{Ccompra}_i \cdot y_{il}) \\
 & \left. + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (\text{Costo}_t \cdot r_{jt}) \right].
 \end{aligned}$$

Tabla 3

Descripción de los términos de la función objetivo

Término	Descripción
$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} (IV_b \cdot u_{jb})$	Ingresos obtenidos por vender productos fabricados en biorrefinerías.
$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (IVE \cdot \text{ECO2}_{\text{evitadas}_i} \cdot y_{il})$	Ganancias por evitar emisiones de CO ₂ al recolectar biomasa.

Término	Descripción
$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} (IVE \cdot \text{ECO2}_{\text{evitadas}_b} \cdot u_{jb})$	Ingresos por evitar emisiones de CO ₂ al usar bio-productos en lugar de combustibles fósiles.
$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \text{CTE} \cdot D_{il} \cdot y_{il}$	Costo de transportar biomasa desde áreas de recolección a puntos de almacenamiento.
$\sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \text{CTE} \cdot D_{lj} \cdot z_{lj}$	Costo de transporte de biomasa desde puntos de almacenamiento a biorrefinerías.
$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} (F_{jt} \cdot u_{jb})$	Gastos operativos de las biorrefinerías según tecnología y cantidad procesada.
$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (G_l \cdot y_{il})$	Costo de procesar biomasa en puntos de almacenamiento.
$\sum_{l \in L} (\text{CA}_l \cdot v_l)$	Costos de apertura y mantenimiento de puntos de almacenamiento.
$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} (\text{C}_{\text{compra}_i} \cdot y_{il})$	Gasto asociado a la compra de biomasa en las zonas de origen.
$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} (\text{Costo}_t \cdot r_{jt})$	Costo de implementar una biorrefinería según tecnología seleccionada.

8.5 Restricciones

1. Solo se elige una tecnología si la biorrefinería está construida:

$$\sum_{t \in T} r_{jt} = x_j \quad \forall j \in J$$

2. La cantidad transportada a los acopios no puede exceder la cantidad de biomasa disponible en los puntos de origen:

$$\sum_{l \in L} y_{il} \leq P_i \quad \forall i \in I$$

3. Lo que entra en los acopios desde el punto de origen es igual a lo que sale hacia las biorrefinerías:

$$\sum_{i \in I} y_{il} = \sum_{j \in J} z_{lj} \quad \forall l \in L$$

4. Solo se puede transportar desde y hacia acopios abiertos:

$$y_{il} \leq P_i \cdot v_l \quad \forall i \in I, \forall l \in L$$

5. La cantidad de biomasa procesada en cada biorrefinería no debe superar la capacidad de la planta:

$$\sum_{l \in L} z_{lj} \leq \sum_{t \in T} (r_{jt} \cdot CP_{jt}) \quad \forall j \in J$$

6. La cantidad de biomasa que llega a una biorrefinería debe ser suficiente para abastecer su producción:

$$\sum_{b \in B} u_{jb} \leq \alpha_{tb} \sum_{l \in L} z_{lj} \quad \forall j \in J, \forall t \in T$$

7. Los tipos de bioproductos que se pueden producir dependen de la tecnología seleccionada en cada biorrefinería:

$$u_{jb} \leq \sum_{t \in T_b} (\alpha_{tb} \cdot CP_{jt} \cdot r_{jt}) \quad \forall j \in J, \forall t \in T$$

En la ecuación T_b hace referencia a la tecnología que corresponde para fabricar el bioproducto b , puesto que se tiene el supuesto de que una tecnología solo puede fabricar un tipo de bioproducto.

8. En cada biorrefinería j , solo se puede elegir una tecnología t :

$$\sum_{t \in T} r_{jt} \leq 1 \quad \forall j \in J$$

9. La operación de las biorrefinerías como un todo, debe generar al menos un número mínimo de empleos para cumplir con los objetivos sociales

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} W_t \cdot r_{jt} + \sum_{l \in L} W_{\text{OPENA}_l} \cdot v_l \geq W_{\text{min}}$$

Dominio de las variables:

$$x_j, v_l, r_{jt} \in \{0, 1\}, \quad y_{il}, z_{lj}, u_{jb} \geq 0$$

Esta información es clave para planificar el uso y la valorización de este recurso en el contexto de una economía más sostenible. En la Tabla 4. se detalla la ubicación y los volúmenes de producción de cascarilla de arroz en el país.

Tabla 4

Producción de cascarilla de arroz en molinos seleccionados

Molino	Latitud	Longitud	Cascarilla de Arroz (ton)
Acacias	3.977826	-73.767175	641
Aguazul	5.171016	-72.550991	19664
Campoalegre	2.685791	-75.326985	48029
Chicoral	4.214809	-74.981275	20281
Espinal	4.147073	-74.896978	22675
Granada	3.545001	-73.705281	22540
Guamal	3.880302	-73.770220	9671
Ibague	4.443990	-75.242610	15548
Jamundi	3.258588	-76.545061	5740
La Copa	5.250864	-72.483373	128549
Lerida	4.863894	-74.903805	25275
Neiva	2.935511	-75.281758	4369
Piedras	4.539070	-74.879982	10908
Purificacion	3.856511	-74.931367	28148
Saldaña	3.929017	-75.017993	13820
San Martin	3.698491	-73.698338	3259
Venadillo	4.715498	-74.930818	5944
Villanueva	10.603717	-72.981936	38550
Villavicencio	4.119327	-73.616569	39538
Yopal	5.349414	-72.401038	14219
Aracataca	10.592590	-74.186618	5915
Barrancabermeja	7.061024	-73.852275	5783
Barranquilla	11.003766	-74.807153	100
Bucaramanga	7.120028	-73.122913	1106
Cucuta	7.889604	-72.496690	45954
Planeta Rica	8.412576	-75.583705	13374
San Marcos	8.662744	-75.128872	30608
Sincelejo	9.304574	-75.390213	6856
Soledad	10.917284	-74.799494	342

Molino	Latitud	Longitud	Cascarilla de Arroz (ton)
Valledupar	10.474410	-73.243634	6699

9.1.2 Distancias y transporte

Para el caso de las distancias entre estas ubicaciones, se consultó en Google Maps. Como resultado, se estableció la siguiente matriz, donde se muestran los municipios en los que se encuentran los molinos y la distancia en kilómetros entre cada uno de ellos. La información obtenida se presenta de forma detallada en el en el archivo adjunto *Parámetros.xlsx*.

Es importante destacar que el costo promedio del transporte de carga en Colombia, según índices oficiales, es de 212 COP/(Km·Tonelada). Este valor, convertido a dólares, equivale aproximadamente a 0.04920 USD/(Km·Tonelada) (Gómez Quiceno et al., 2022).

9.1.3 Tecnologías para la producción de bioproductos

Para la realización de bioproductos se identificaron varias tecnologías, dentro de estas se seleccionaron para el estudio la pirolisis rápida para la producción de biochar, debido a su eficiencia y capacidad de generar un material carbonoso con alta porosidad, útil en la mejora de suelos y la adsorción de contaminantes, como resaltan (Bushra y Remya, 2020). Para la producción de nanoporosa de sílice (NPS), la síntesis por precipitación química destaca por su capacidad de extraer sílice de alta pureza con aplicaciones en materiales avanzados, según lo demostrado por (Janasree y Kumar, 2018).

Por ultimo, para el caso de la lignina, se consideraron cuatro tecnologías: extracción de refrescos (SE), extracción kraft (KE), extracción Organosolv (OE) y extracción de ligno-sulfonato (LE) (Carvajal et al., 2016). Entre estas, se decide trabajar de manera específica con la tecnología de extracción de refrescos (SE), debido a la facilidad de información respecto al proceso con la cual se cuenta.

9.1.4 Capacidades y rendimientos por tecnología

Para determinar la capacidad de producción máxima de cada tecnología, se analizó el rendimiento obtenido a partir de la transformación de la cascarilla de arroz. Este análisis per-

mitió identificar variaciones según el bioproducto, influyendo directamente en las cantidades finales producidas.

En la Tabla 5 se puede observar el resumen de las capacidades y rendimientos estimados para cada tecnología, basados en la literatura consultada.

Tabla 5

Producción y rendimiento por tecnología.

Tecnología (T)	Producción (ton/año)	Referencia Producción	Rendimiento (%)	Referencia Rendimiento
SE	33,334	Chen et al. (2024)	0.30	Zambrano et al. (2021)
Pirólisis rápida	60,000	Torres-Morales et al. (2023)	0.25	Amalina et al. (2022)
Síntesis de precipitación	18,250	Kim and Lim (2022)	0.15	Dannette et al. (2022)

9.1.5 Ingresos por bioproductos y emisiones evitadas

Los ingresos derivados de la venta de bioproductos fueron estimados con base en los precios actuales del mercado. Entre los productos analizados, el más valioso es el NPS (nanopartículas de sílice), que tiene un precio de 2,500 USD/ton (Alibaba, 2025b). Por su parte, el biochar tiene un precio de 320 USD/ton (Alibaba, 2025a), mientras que la lignina se vende a 500 USD/ton respectivamente (Alibaba, 2025c). Estos precios reflejan el potencial económico de cada producto, influenciado por su rendimiento y aplicaciones.

En cuanto a los ingresos por emisiones evitadas, estos se calcularon utilizando el costo social del carbono (SCC) como referencia. A nivel internacional, el SCC tiene un valor estimado de 132 USD por tonelada de CO_2 , en el contexto específico de América Latina, este valor se reduce a 25 USD por tonelada de CO_2 , mientras que en el caso colombiano este solo alcanza un valor de 5 USD por tonelada de CO_2 . Estos valores evidencian la relevancia económica y social de reducir las emisiones de GEI en ambos ámbitos, al integrar los impactos climáticos y económicos asociados a su mitigación (Alatorre et al., 2019; Moore et al., 2024; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2018).

9.1.6 Costos de producción

Para el caso de los costos, se encontró que el costo de la cascarilla de arroz, utilizada como materia prima principal, se estima en aproximadamente 5 USD por tonelada, según el estudio de referencia (Carvajal et al., 2016). Sin embargo, los costos operativos y de producción varían significativamente dependiendo de la tecnología empleada para transformar este subproducto en bioproductos de valor agregado. Estos costos reflejan las diferencias en los procesos tecnológicos, los insumos requeridos y las condiciones de operación, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Costo de operación por tecnología.

Tecnología	Costo de Operación (USD/ton)	Referencia
SE	350	Carvajal et al. (2016)
Pirólisis	57	Torres-Morales et al. (2023)
Síntesis de precipitación	548	Kim y Lim (2022)

9.1.7 Costos de inversión

El análisis de los costos de inversión de capital (CAPEX) se realizó considerando las tecnologías evaluadas en el modelo. Se identificó que estos costos varían significativamente según el proceso productivo empleado, reflejando las diferencias en infraestructura, equipamiento y requisitos técnicos de cada tecnología. En la Tabla 7, se presentan los valores estimados de inversión inicial para cada alternativa tecnológica.

Tabla 7

Costo de inversión por tecnología.

Tecnología	CAPEX	Referencia
SE	35,110,000	Carvajal et al. (2016)
Pirólisis	6,600,000	Torres-Morales et al. (2023)
Síntesis de precipitación	13,500,000	Kim y Lim (2022)

Para evaluar la viabilidad financiera del proyecto y analizar distintos escenarios de recuperación de inversión, se establecieron horizontes de vida de 5, 7, 10, 15 y 20 años. Esto

permite modelar diferentes casos y determinar en qué condiciones el proyecto alcanza su punto de equilibrio.

Adicionalmente, se definieron los siguientes parámetros financieros para el análisis:

- **Tasa de descuento:** Se estableció en 13.4 %, calculada mediante la combinación de una tasa de inflación asumida del 4 % y una tasa de descuento del 9 % (Torres-Morales et al., 2023).
- **Tasa de impuestos:** Se consideró una tasa del 35 %, correspondiente al impuesto corporativo nacional según la ley 2277 de 2022 del Congreso de Colombia.
- **Divisa:** Los valores de inversión y costos operativos se expresan en dólares estadounidenses (USD), facilitando la comparación con estudios de referencia y permitiendo una evaluación financiera alineada con mercados internacionales.

9.1.8 Costos de almacenamiento

Los costos asociados al acopio de la biomasa se analizaron considerando tanto los costos fijos como los operativos. En términos de costos fijos, el mantenimiento anual de un punto de acopio se estimó en 91,800 USD/año, según el documento elaborado por el Banco Iberoamericano de Desarrollo, titulado Estimación de costos de recolección selectiva y clasificación de residuos con inclusión de organizaciones de recicladores, complementado con consultas a expertos (Correal y Laguna, 2018).

Para calcular los costos operativos del acopio, ya que estos dependen del volumen ocupado por la biomasa se debió consultar características que podrían afectar o influenciar.

Para los costos operativos, se tuvo en cuenta que la cascarilla de arroz es un material de baja densidad, quebradizo y abrasivo, con un peso específico de $125 \text{ kg}/\text{m}^3$. Esto implica que una tonelada de cascarilla ocupa aproximadamente 8 m^3 a granel (Prada y Cortés, 2010). A partir de esta característica, se calcularon los costos por metro cuadrado de almacenamiento, utilizando datos reportados en el Informe de Oferta de Mercado Inmobiliario de Fedelonjas (FEDELONJAS, 2023). Los valores promedio mensuales por región en Colombia son los siguientes:

- **Antioquia:** $27,522 \text{ COP}/\text{m}^2$.

- **Bogotá:** 22,888 COP/ m^2 .
- **Costa Caribe:** 15,189 COP/ m^2 .
- **Orinoquía:** 23,520 COP/ m^2 .

Para el sistema de almacenamiento, se definió una altura máxima de 3 metros, utilizando un modelo sencillo de apilamiento. Además, se consideró que el costo anual de operación dentro del acopio equivale al 4% del costo de la inversión anual en capacidad, siguiendo las recomendaciones de (Ko et al., 2018). El cálculo detallado del costo total de almacenamiento, considerando la densidad del material, la altura y los costos regionales, se resume en la Tabla 8. Esta tabla permite visualizar las diferencias en costos operativos entre las distintas regiones del país, ofreciendo un panorama claro para la toma de decisiones en la logística de acopio.

9.1.9 Impacto ambiental y emisiones

Este ítem está relacionado en el sistema con aspectos como el transporte, las tecnologías de procesamiento, el acopio y las emisiones evitadas gracias al aprovechamiento de la cascarilla de arroz.

Para las emisiones relacionadas con el transporte (ECO_2T), se encontró que los factores de emisión varían según el tipo de vehículo utilizado, en la Tabla 9 se observan los valores en ton CO_2 /ton-km para camiones consultados (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), 2021, 2022).

En cuanto a las tecnologías empleadas, las emisiones operativas asociadas a la extracción soda-free fueron de 20 kg CO_2 /ton de producto, mientras que en el caso del biochar, producido mediante pirólisis rápida, estas ascendieron a 70 kg CO_2 /ton de producto, y para la síntesis de nanopartículas de sílice (NPS), el valor alcanzó los 100 kg CO_2 /ton de producto (Carvajal et al., 2016; Schwartz et al., 2020; Kim y Lim, 2022).

Por otro lado, las emisiones asociadas al acopio se calcularon considerando el consumo de diésel y electricidad, resultando en un total promedio de 1.64 kg CO_2 /ton, derivado de un consumo de 0.5 litros de diésel por tonelada, con un factor de emisión de 2.68 kg CO_2 /litro, y de 1.5 kWh de electricidad por tonelada, con un factor de emisión de 0.2 kg CO_2 /kWh (Mantilla-Romo et al., 2023; Medina et al., 2016).

Tabla 8*Costos de operación y almacenamiento por ciudad.*

Ciudad	Región	Valor (COP/m ²)	Costo unitario (COP/m ³)	Costo ope- ración (COP/ton)	Costo ope- ración anual (COP/ton)	Costo ope- ración anual (USD/ton)
Acacías	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Aguazul	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Campoalegre	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Chicoral	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Espinal	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Granada	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Guamal	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Ibagué	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Jamundí	Pacífica	15,470	5,363	42,904	514,848	120
La Copa	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Lérida	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Neiva	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Piedras	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Purificación	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Saldaña	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
San Martín	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Venadillo	Andina	20,857	7,230	57,840	694,080	161
Villanueva	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Villavicencio	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Yopal	Orinoquía	23,520	8,154	65,232	782,784	182
Aracataca	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Barrancabermeja	Andina	17,934	6,217	49,736	596,832	139
Barranquilla	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Bucaramanga	Andina	17,934	6,217	49,736	596,832	139
Cúcuta	Andina	17,934	6,217	49,736	596,832	139
Planeta Rica	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
San Marcos	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Sincelejo	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Soledad	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118
Valledupar	Caribe	15,189	5,266	42,128	505,536	118

Por último, las emisiones evitadas en el origen se estimaron bajo el supuesto de que la biomasa no aprovechada es quemada, lo que implica que cada kilogramo de cascarilla no quemado evita 1.6 kg de CO_2 (Holder et al., 2017), de acuerdo con estudios que reportan que, en 2014, la quema de residuos agrícolas en Colombia generó 271.7 mil toneladas/año de emisiones (Vargas, 2020). Asimismo, las emisiones evitadas por bioproductos reflejan un potencial de mitigación de 3.92 toneladas de CO_2 equivalente por tonelada de biochar, mien-

Tabla 9*Emisiones de CO₂ por tipo de vehículo.*

Vehículo	ton CO₂/ton-km
Camiones C2 pequeños	0,0859
Camiones C2 grandes	0,0776
Tractocamiones	0,05608

tras que para el caso de las nanopartículas de sílice y la lignina los valores fueron de 3.92 y 1.36 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de producto, respectivamente, destacando la contribución de estos bioproductos a la reducción de emisiones y a la sostenibilidad operativa del sistema (Muñoz-Muñoz et al., 2020; Carrier et al., 2024).

9.1.10 Empleos generados

Los valores estimados de empleo para las tecnologías de extracción de lignina (LE), producción de biochar, síntesis de nanopartículas de sílice (NPS) y operaciones de acopio se fundamentan en estudios existentes sobre cadenas productivas y costos laborales en el sector agroindustrial colombiano. Aunque no se encuentra un valor explícito en la literatura, los datos se basan en las necesidades típicas de personal reportadas para actividades similares. La extracción de lignina genera mínimo 20 empleos (Carvajal et al., 2016), la producción de biochar requiere 15 empleos, la síntesis de nanopartículas de sílice emplea al menos 10 personas, mientras que las operaciones de acopio demandan mínimo 13 empleos (Correal y Laguna, 2018), valores determinados por el nivel de automatización de los procesos, las etapas operativas involucradas y los costos laborales promedio en Colombia (Torres-Morales et al., 2023).

9.2 Validación del modelo

La validación del modelo de optimización se realizó mediante la ejecución de múltiples escenarios en los que se variaron tres factores clave: el número de biorrefinerías (2, 5 y 10), el horizonte de inversión (5, 7, 10, 15 y 20 años) y el costo social del carbono (5, 25 y 132 USD por tonelada de CO₂ evitada). Se ejecutaron alrededor de 60 simulaciones para evaluar la viabilidad del proyecto a través del análisis del Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). También se consideraron aspectos estratégicos de localización de

biorrefinerías con base en factores logísticos y de mercado, representados geográficamente mediante mapas. Para complementar el análisis, se incluyó la justificación de los parámetros financieros utilizados, destacando una tasa de descuento del 13.5 % y un impuesto del 35 %. Finalmente, se incorporó un estudio comparativo sobre la rentabilidad del proyecto según la reducción de emisiones o la generación de bioproductos, con el objetivo de definir la estrategia óptima para su implementación en Colombia, estos se pueden visualizar con mayor precisión en la sección de resultados.

Los resultados de la validación se describen a continuación:

9.2.1 Ubicación de las biorrefinerías

La localización de las biorrefinerías en los distintos escenarios fue determinada considerando la accesibilidad a biomasa, la infraestructura disponible y la cercanía a los mercados de consumo de bioproductos (asumimos que estos mercados están en las zonas en donde se produce la biomasa).

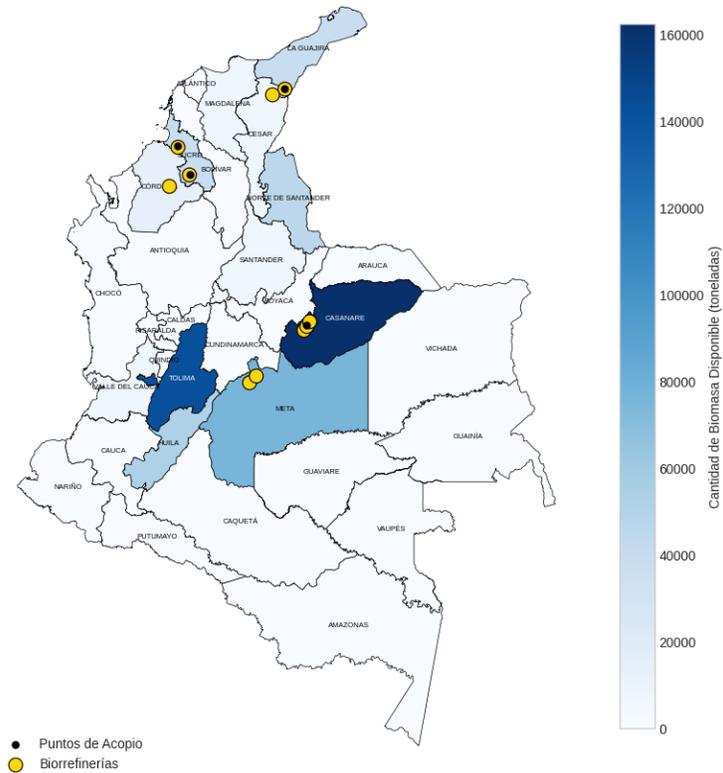
Respecto a los criterios de selección, se priorizaron regiones con alta disponibilidad de biomasa residual con el fin de minimizar los costos de transporte y ubicar estratégicamente las biorrefinerías para garantizar una distribución eficiente de los bioproductos. Los resultados obtenidos al evaluar estas ubicaciones con un Costo Social del Carbono (SCC) de 5 y 25 USD/ton CO_2 se pueden visualizar en la Figura 8, donde se presentan las localizaciones para cada escenario.

En el caso de 2 biorrefinerías, se ubicaron en La Copa y Yopal, con un único punto de acopio en La Copa. Para el escenario de 5 biorrefinerías, se seleccionaron las ubicaciones de Aguazul, La Copa, Villanueva, Yopal y Valledupar, estableciendo puntos de acopio en La Copa y Villanueva. Finalmente, en el escenario de 10 biorrefinerías, las instalaciones se distribuyeron en Acacías, Aguazul, La Copa, Villanueva, Villavicencio, Yopal, Planeta Rica, San Marcos, Sincelejo y Valledupar, con puntos de acopio adicionales en San Marcos y Sincelejo.

Al aumentar el SCC a 132 USD/ton CO_2 , se observaron cambios en la localización de las biorrefinerías en los escenarios con 5 y 10 instalaciones. En el primero, se incorporó una biorrefinería en San Marcos, junto con un nuevo punto de acopio en la misma ubicación. En el segundo, se redistribuyeron las biorrefinerías con nuevas incorporaciones en Chicoral, Ibagué y Jamundí, además de puntos de acopio adicionales en Jamundí y Planeta Rica, como

Figura 8

Ubicaciones para puntos de acopio y biorrefinerías escenarios con IVE = 5 y 25.

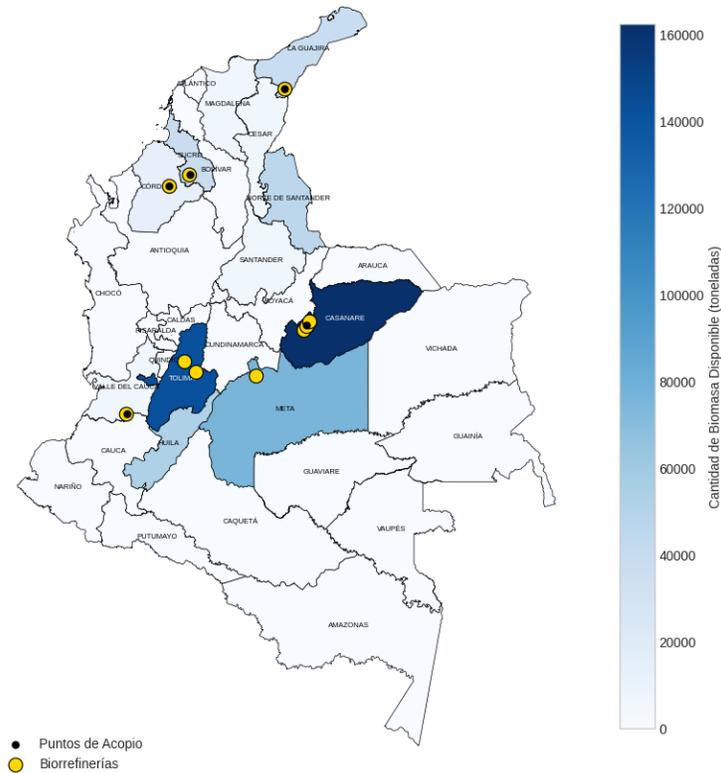


se muestra en la Figura 9.

Estos cambios muestran cómo el modelo ajusta la ubicación de las biorrefinerías según la cantidad de biomasa disponible y el impacto de los costos ambientales. A medida que el SCC aumenta, se da prioridad a la producción de biochar en lugar de NPS, lo que requiere procesar más biomasa y ubicar las biorrefinerías en zonas con mayor disponibilidad de recursos. Como resultado, el modelo optimiza la distribución de las instalaciones para reducir los costos de transporte y disminuir las emisiones generadas por el traslado de biomasa a gran escala. En general, esto demuestra que al valorar mejor los costos ambientales, no solo mejora la viabilidad del proyecto, sino que también se impulsa una ubicación más estratégica de las biorrefinerías en regiones donde pueden generar un mayor impacto en la reducción de emisiones y aprovechar mejor los recursos disponibles.

Figura 9

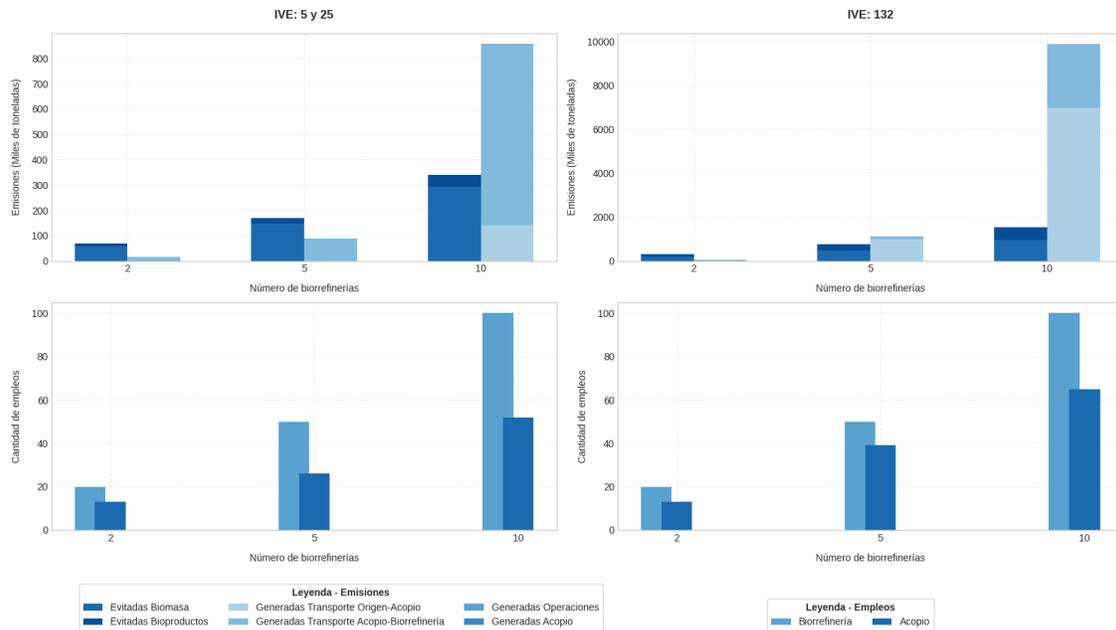
Ubicaciones para puntos de acopio y biorrefinerías escenarios con IVE = 132.



9.2.2 Emisiones y empleos

Para visualizar el comportamiento de las emisiones en el modelo, se simuló el escenario con el SCC colombiano en un horizonte de 5 años. Este análisis permitió observar que, a medida que aumenta el número de biorrefinerías, las emisiones generadas por el transporte también incrementan debido a la mayor movilización de biomasa. Sin embargo, este efecto se ve compensado por una reducción significativa de emisiones, ya que se procesa un mayor volumen de biomasa y se obtienen más bioproductos con impacto ambiental positivo. Como se muestra en la Figura 10, aunque las emisiones asociadas al transporte y las operaciones aumentan con la cantidad de biorrefinerías, las emisiones evitadas por el procesamiento de biomasa y la producción de bioproductos también se incrementan.

Para el caso de los empleos estos siempre aumentan al permitir más biorrefinerías. Sin

Figura 10*Emisiones y empleos generados.*

embargo, no existen variaciones significativas cuando se varía el precio del SSC.

9.2.3 Análisis de viabilidad financiera

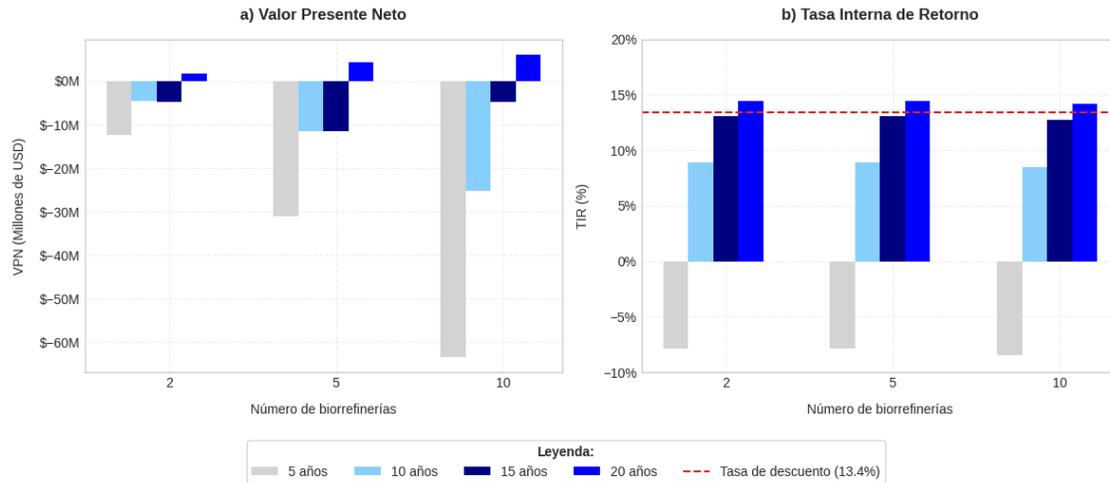
El análisis de la viabilidad financiera se llevó a cabo evaluando diferentes horizontes de inversión para determinar el momento en que el proyecto se vuelve rentable. Se calcularon los valores de VPN y TIR para cada horizonte considerando los ingresos generados por los bioproductos y los costos asociados a la operación de las biorrefinerías teniendo en cuenta el SCC colombiano (IVE=5) como se muestra en la Figura 11.

De la figura anterior se puede concluir lo siguiente:

- **Horizonte de 5 años:** Los resultados indican que el proyecto es inviable en este período, ya que el VPN es negativo y la TIR no alcanza el umbral mínimo de rentabilidad. Esto se debe a que el tiempo es insuficiente para recuperar la inversión inicial, especialmente debido a los altos costos operativos y logísticos

Figura 11

Variación del VPN y TIR para $IVE = 5$, con diferentes horizontes



- Horizonte de 7 años:** En comparación con el horizonte de 5 años, se observa una mejora en los indicadores financieros, aunque el proyecto aún no alcanza una rentabilidad aceptable. La recuperación de la inversión sigue siendo insuficiente debido al tiempo limitado de generación de ingresos.
- Horizonte de 10 y 15 años:** En un horizonte de inversión de 10 años con un IVE de 5 USD/ton CO_2 , el proyecto resulta inviable, con VPN negativos y TIR máximas de 8.91 %, por debajo de la tasa de descuento. A 15 años, aunque los VPN siguen siendo negativos, las TIR mejoran y oscilan entre 12.70 % y 13.06 %, acercándose al umbral de rentabilidad, pero aún insuficientes para justificar la inversión.
- Horizonte de 20 años:** A partir de 20 años, el proyecto comienza a ser rentable. Se identifica un punto de equilibrio financiero entre los 15 y 20 años, donde el VPN se vuelve positivo para todas las configuraciones, alcanzando 1,741,069.436 USD con 2 biorrefinerías, 4,370,909.329 USD con 5 biorrefinerías y 6,086,348.028 USD con 10 biorrefinerías. Además, las TIR superan la tasa de descuento establecida del 13.5 % mostrando una mejora gradual con el aumento del número de biorrefinerías.

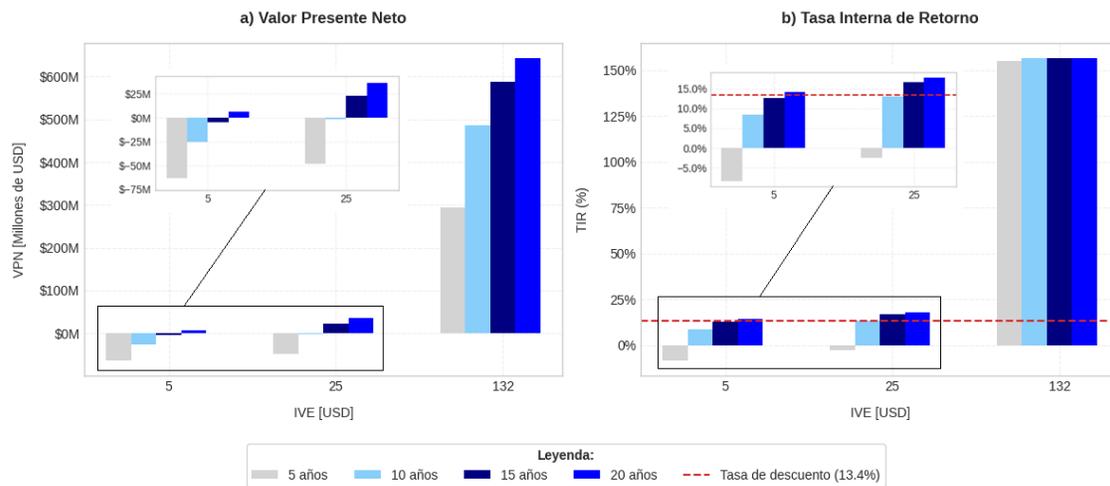
Estos resultados muestran que la rentabilidad del proyecto mejora significativamente a medida que se extiende el horizonte de inversión, con un punto de equilibrio que está alrededor de más de 15 años.

9.2.4 Impacto del costo social en la rentabilidad

En esta se evaluó la influencia del costo social del carbono en la rentabilidad del proyecto, considerando valores de 5, 25 y 132 USD por tonelada de CO_2 evitada. A continuación, en la Figura 12, se presentan los resultados obtenidos y su impacto en la inversión.

Figura 12

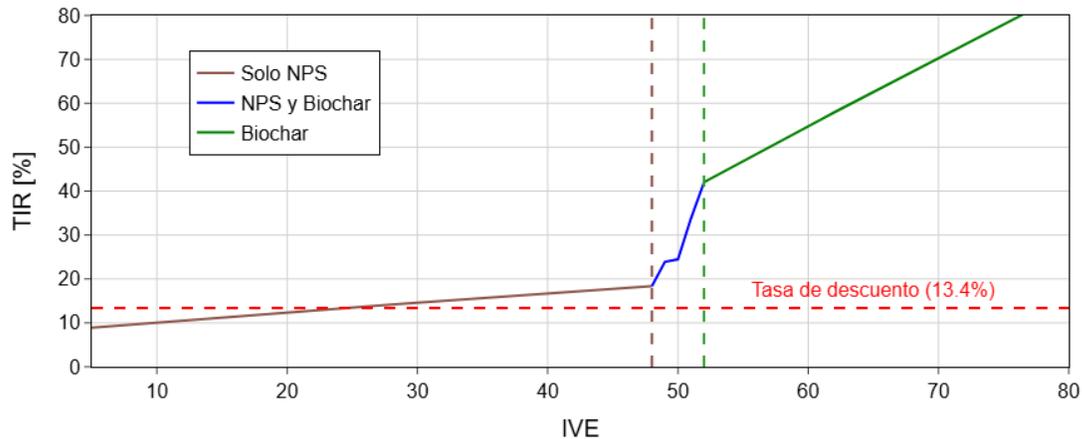
Variación del VPN y TIR para iguales horizontes y diferentes IVE.



En un horizonte de 10 años, el aumento del costo social del carbono mejora significativamente la viabilidad del proyecto. Con un costo social bajo, el proyecto es inviable en todas las configuraciones. A un costo social intermedio, algunos escenarios comienzan a ser rentables, aunque de forma limitada. En contraste, un costo social alto garantiza la rentabilidad en todas las configuraciones, reflejando el impacto positivo de internacionalizar los beneficios ambientales para el ámbito financiero local.

9.2.5 Identificación de valores críticos para la rentabilidad

Para identificar este se realizó un análisis de sensibilidad en el que se evaluó cuánto debe cambiar el costo social del carbono para que la inversión pase de inviable a viable, tomando en cuenta las TIR asociadas a diferentes combinaciones de bioproductos. Este se evidencia en la Figura 13 que muestra cómo la TIR varía en función del costo social del carbono (IVE).

Figura 13*Variación del IVE con 5 biorrefinerías.*

El análisis revela que la inversión pasa de negativa a positiva cuando el costo social del carbono supera aproximadamente los 25 USD/ton CO_2 para proyectos con 5 biorrefinerías y los 27 USD/ton CO_2 para proyectos con 10 biorrefinerías, siendo el IVE viable a partir de estos valores. Se encontró además que hasta un IVE de 48, se produce únicamente NPS (línea marrón); entre un IVE de 48 y 52, se producen tanto NPS como Biochar (línea azul) y a partir de un IVE de 52, se produce únicamente Biochar (línea verde), lo que resulta en una TIR significativamente superior a la tasa de descuento, volviendo esta combinación altamente rentable.

Estos resultados indican que la internalización de los beneficios ambientales mediante un costo social adecuado es crucial para mejorar la rentabilidad del proyecto y justificar la inversión en biorrefinerías.

Dado que las biorrefinerías producen diversos bioproductos con diferentes valores comerciales y beneficios ambientales, se incorporó un análisis específico en el que se evalúa la contribución de cada bioproducto a la rentabilidad del proyecto. Se busca responder si el modelo debe priorizar la reducción de emisiones o la generación de bioproductos para determinar la mejor estrategia de implementación.

En las siguientes secciones, se presentarán los resultados detallados de estos análisis, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones sobre la localización y operación

de biorrefinerías en Colombia.

9.2.6 *Análisis de bioproductos según la variación del costo social*

En el desarrollo del modelo, se estableció la posibilidad de elegir entre tres bioproductos: NPS, lignina y biochar. Durante el análisis de los escenarios, se identificó una relación directa entre la generación de estos productos, las emisiones asociadas y el costo social del carbono establecido.

A continuación, se presenta la Tabla ?? que resume el costo social por emisiones evitadas, los bioproductos generados, sus cantidades, y cómo estas decisiones afectan la función objetivo, lo anterior para 10 biorrefinerías y variando el valor del costo social.

Tabla 10

Costo social, producción y rendimiento de bioproductos.

IVE	Bioproductos	Cantidad [ton]	Funcion Objetivo [%]	Ingresos emisiones [%]
132	Biochar	14,500	152,518,257	50.4
25	NPS	2737	2,491,503	46.7
5	NPS	2737	18,144,280	1.3

El análisis muestra que los escenarios con mayor costo social (132 USD/ton CO_2) promueven la producción de bioproductos como el biochar, el cual genera menores emisiones en su producción y contribuye al secuestro de carbono. En contraste, con costos sociales bajos (5 y 25 USD/ton CO_2), se priorizan bioproductos como el NPS debido a sus menores costos de producción y la ausencia de incentivos fuertes para reducir emisiones.

La transición del NPS al biochar en escenarios con costos sociales altos por emisiones evitadas refleja una preferencia por bioproductos con menor impacto ambiental. Con un costo social bajo, el enfoque recae en la rentabilidad económica inmediata, favoreciendo productos como el NPS. Sin embargo, al aumentar el costo social a 132 USD/ton CO_2 como el que se usa a nivel mundial, se prioriza la reducción de emisiones y la sostenibilidad, haciendo del biochar el bioproducto más viable por su impacto ambiental positivo y su contribución al secuestro de carbono.

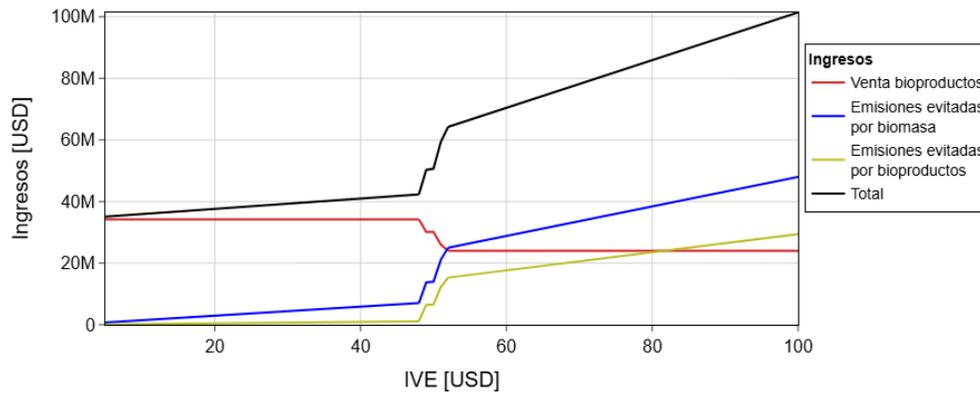
9.2.7 Análisis de prioridad: reducción de emisiones vs producción de bioproductos

La validación del modelo permitió identificar la influencia del horizonte de inversión, el número de biorrefinerías y el costo social del carbono en la viabilidad del proyecto. A medida que aumenta el tiempo de inversión y la cantidad de biorrefinerías, los valores de VPN y TIR mejoran. En horizontes menores, la rentabilidad es limitada, aunque puede mejorar con un IVE más alto, lo que acelera la recuperación de la inversión.

Se encontró que el valor agregado de los bioproductos está directamente influenciado por el costo social del carbono y su impacto en la rentabilidad del proyecto. En escenarios con un costo social bajo como el caso colombiano (5 y 25 USD/ton CO_2), la producción se orienta hacia bioproductos con mayor rentabilidad económica inmediata, como el NPS, ya que las políticas ambientales no generan suficiente incentivo para priorizar productos con beneficios ecológicos a largo plazo. En estos casos, los criterios de selección se centran en costos de producción y demanda de mercado, sin considerar significativamente la reducción de emisiones.

Por otro lado, cuando el costo social del carbono aumenta (132 USD/ton CO_2), la lógica de producción cambia. En este escenario, el biochar se convierte en el bioproducto preferido, ya que no solo genera un impacto positivo en términos de secuestro de carbono y mejora de suelos, sino que también responde a las políticas que buscan reducir las emisiones totales del proyecto. La Figura 14 ilustra cómo el ingreso total y su composición cambian en función del IVE, destacando el impacto de los bioproductos y las emisiones evitadas sobre la rentabilidad del proyecto. La implementación de un costo social elevado motiva la producción de bioproductos con menor impacto ambiental y una contribución directa a la sostenibilidad.

Este cambio en la priorización de bioproductos demuestra que, cuando el costo social es bajo, el enfoque está en la rentabilidad económica inmediata, mientras que con un costo social alto, la reducción de emisiones y los beneficios ambientales adquieren mayor peso en la toma de decisiones. Esta dinámica evidencia la necesidad de diseñar estrategias regulatorias y de incentivos que equilibren los objetivos económicos y ambientales para optimizar la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto.

Figura 14*Ingresos vs IVE.*

10 Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten establecer estrategias óptimas de implementación que maximizan tanto la rentabilidad como la sostenibilidad del proyecto, evidenciando cómo el horizonte de inversión, el número de biorrefinerías y el costo social del carbono influyen directamente en la viabilidad financiera, social y ambiental. En el caso de proyectos con 2 biorrefinerías, si bien la inversión inicial es menor, los ingresos generados también son limitados, lo que ralentiza la recuperación de costos y reduce significativamente la rentabilidad a largo plazo. Por otro lado, la implementación de 5 biorrefinerías logra un equilibrio adecuado entre los costos operativos y la generación de ingresos, permitiendo una mejora sustancial en la rentabilidad sin un incremento excesivo de la inversión inicial. Sin embargo, cuando se consideran 10 biorrefinerías, aunque se maximiza la producción y distribución de bioproductos, los costos logísticos y operativos aumentan significativamente, haciendo que la rentabilidad dependa en gran medida de la valorización de las reducciones de emisiones asociadas al proyecto.

En cuanto al horizonte de inversión para el caso de Colombia, se determinó que períodos más cortos no permiten alcanzar la rentabilidad esperada. En los escenarios de 5 y 7 años, el VPN es negativo y la TIR no alcanza los valores necesarios para justificar la inversión, lo que demuestra que el tiempo es insuficiente para recuperar los costos operativos y de infraestructura. En un horizonte de 10 años, aunque se observa una mejora en la recuperación

de la inversión, los valores de rentabilidad aún no son suficientes para garantizar la viabilidad del sistema. A partir de 15 años, la rentabilidad mejora significativamente y se acerca al punto de equilibrio, con TIR que oscilan entre el 12.70 % y el 13.06 %. No obstante, la validación del modelo indica que el horizonte óptimo es de 20 años, ya que en este escenario el proyecto se vuelve completamente rentable en todas sus configuraciones, alcanzando un VPN positivo de 215,780,940 USD y una TIR superior al 23 %. Este resultado resalta la importancia de extender el periodo de inversión para garantizar la sostenibilidad financiera del proyecto a largo plazo.

Además, cabe resaltar que este escenario se distingue por generar el mayor impacto social, con la creación de 100 empleos directos en biorrefinerías y 52 en puntos de acopio, mientras que en términos ambientales maximiza tanto la reducción de emisiones como la producción de bioproductos con alto impacto positivo, como el biochar.

El costo social del carbono es otro factor clave que afecta tanto la rentabilidad como la estrategia de producción de las biorrefinerías. Se observó que en escenarios con 5 USD/ton CO_2 , la rentabilidad del proyecto depende casi exclusivamente de la venta de bioproductos, ya que los ingresos por reducción de emisiones son marginales. Sin embargo, cuando el costo social del carbono aumenta a 25 USD/ton CO_2 , la valorización de las emisiones evitadas comienza a representar un porcentaje significativo de los ingresos, mejorando la viabilidad del sistema. En el escenario más alto, con 132 USD/ton CO_2 , la producción de biochar se vuelve prioritaria debido a su alto impacto en la reducción de emisiones y su contribución al secuestro de carbono. En este caso, la internalización de los beneficios ambientales garantiza una recuperación más rápida de la inversión y una rentabilidad sostenida en el tiempo. Estos resultados sugieren que la implementación de políticas que ajusten progresivamente el costo social del carbono en Colombia permitiría alinear el proyecto con estándares internacionales y mejorar su viabilidad económica y ambiental.

Con lo que respecta al funcionamiento del sistema, este demostró ser eficiente en términos de producción y optimización de recursos. La validación reflejó que la producción de bioproductos varía en función del número de biorrefinerías y el costo social del carbono. En escenarios con costos sociales bajos, la producción de nanopartículas de sílice (NPS) se mantiene estable, reflejando la capacidad del sistema para operar de manera eficiente bajo estas condiciones. Sin embargo, en escenarios con costos sociales más altos, se evidencia una transición progresiva hacia la producción de biochar, lo que permite mejorar la rentabilidad del sistema sin comprometer la eficiencia operativa. A pesar de esto, la validación del modelo también mostró que la simple expansión de la infraestructura no garantiza una me-

jora proporcional en el rendimiento económico y ambiental, ya que los costos de operación y transporte pueden volverse poco competitivos si no se optimizan adecuadamente.

Enfatizando en el biochar, en este estudio se resalta la importancia de este como un insumo clave para mitigar los efectos negativos de prácticas humanas como las agrícolas insostenibles, como el uso excesivo de fertilizantes químicos y la degradación de suelos. Debido a que su aplicación no solo mejora la retención de agua y nutrientes, sino que también reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos, disminuyendo así las emisiones de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el CO_2 . En este sentido, la integración del biochar en los sistemas agrícolas podría representar una estrategia eficaz para incrementar la sostenibilidad del sector agroindustrial en Colombia, alineando el modelo de biorrefinerías con una visión de economía circular y regenerativa.

Los ingresos del sistema provienen principalmente de dos fuentes: la venta de bioproductos y los beneficios por reducción de emisiones. En los escenarios con costos sociales bajos, la venta de NPS es la principal fuente de ingresos, mientras que las emisiones evitadas representan un porcentaje marginal. Sin embargo, cuando el costo social del carbono aumenta, los ingresos por emisiones evitadas comienzan a ser un componente clave en la rentabilidad del proyecto. En particular, con 132 USD/ton CO_2 , la valorización de las reducciones de emisiones supera incluso los ingresos por la comercialización de bioproductos, lo que refuerza la necesidad de políticas que incentiven la internalización de los costos ambientales. Además, en el escenario de 10 biorrefinerías con un horizonte de 20 años, la combinación de ingresos por bioproductos y emisiones evitadas genera la mayor rentabilidad del proyecto.

La selección de tecnologías de conversión también juega un papel fundamental en la rentabilidad del sistema. Se observó que el biochar, con un rendimiento del 25 %, y las ligninas, con hasta un 30 %, presentan valores de conversión que los posicionan como alternativas viables, aunque menos rentables que las NPS en escenarios con costos sociales bajos. Esto demuestra que la elección de tecnologías adecuadas no solo impacta la cantidad de bioproductos generados, sino que también afecta la eficiencia del sistema en términos de reducción de pérdidas de biomasa y disminución de emisiones. Es por esto que se recalca que la optimización de estos procesos es clave para mejorar la rentabilidad del sistema y reducir los costos operativos a lo largo del tiempo.

11 Limitaciones

A pesar de que el modelo desarrollado se construyó con base en supuestos bien fundamentados, el uso de un transporte unimodal basado en camiones y los rendimientos fijos de las tecnologías utilizadas. Uno de los mayores desafíos presentados fue la falta de datos específicos en la literatura y en bases de datos locales, lo que dificultó la obtención de información confiable para alimentar el modelo. Este vacío generó incertidumbres en parámetros críticos como los costos logísticos, los rendimientos reales en procesos tecnológicos alternativos y las emisiones asociadas a cada etapa del sistema.

Otra limitación relevante fue la exclusividad en la asignación de tecnologías a un solo bioproducto, lo que significa que cada biorrefinería solo podía producir un tipo de bioproducto con una tecnología específica. Aunque este enfoque permite modelar sistemas especializados, también limita la flexibilidad para diversificar la producción y maximizar los ingresos, especialmente si se considera que bioproductos como ligninas o biochar podrían generarse con las tecnologías disponibles, complementando los ingresos y mejorando la sostenibilidad del sistema.

Además, aunque se utilizaron supuestos como un rendimiento tecnológico fijo y se consideraron costos homogéneos de transporte y almacenamiento, estos parámetros podrían variar en condiciones reales. Por ejemplo, en términos de costos logísticos, la simplificación de considerar nulos los costos asociados al transporte desde los puntos de origen hacia los acopios representa una limitación significativa, ya que no se reflejan adecuadamente los costos y las emisiones generadas en esta etapa. Este aspecto es particularmente importante en regiones rurales con infraestructura vial limitada, donde el transporte podría representar un costo significativo y una fuente importante de emisiones de CO_2 .

Asimismo, el modelo no consideró estrategias de aprovechamiento para la biomasa no procesada, lo que podría representar una oportunidad desaprovechada tanto en términos de ingresos adicionales como en la reducción de emisiones.

Finalmente, también existe un aspecto crítico dada la limitación en la producción de bioproductos dentro de cada biorrefinería. Actualmente, el sistema permite que cada instalación produzca un solo tipo de bioproducto, lo que restringe la flexibilidad y diversificación de ingresos. En escenarios con costos sociales bajos, la producción se centra en NPS, mientras que en costos sociales elevados se prioriza la producción de biochar. Esta rigidez en la configuración del modelo puede representar un riesgo, especialmente si las condiciones del mercado

cambian o si surgen políticas que favorezcan otros productos. Para mejorar la resiliencia del sistema y su capacidad de adaptación, sería recomendable explorar configuraciones que permitan la producción simultánea de múltiples bioproductos dentro de cada biorrefinería, lo que incrementaría la rentabilidad y la sostenibilidad del proyecto en el tiempo.

12 Recomendaciones y trabajos futuros

Para garantizar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto, es fundamental adoptar estrategias que optimicen tanto la rentabilidad como el impacto ambiental. Se recomienda establecer un horizonte de inversión acorde con los objetivos financieros y operativos. Dado que el costo social del carbono juega un papel determinante en la recuperación de la inversión, es crucial implementar una política de ajuste progresivo en Colombia, acercándolo al estándar global de 132 USD/ton CO_2 , lo que permitiría mejorar la rentabilidad del proyecto al incentivar la reducción de emisiones.

Además, para potenciar el desarrollo del sector, se recomienda la implementación de subvenciones gubernamentales que fomenten la adopción de tecnologías avanzadas en la producción de biochar, promoviendo procesos más eficientes y sostenibles. Asimismo, establecer incentivos fiscales y mecanismos de mercado para la comercialización de bioproductos y créditos de carbono facilitaría la generación de ingresos adicionales, fortaleciendo la competitividad del proyecto. La priorización de bioproductos con alto impacto ambiental, mediante el uso de tecnologías eficientes, contribuiría significativamente a la reducción de emisiones, alineando la producción con objetivos de sostenibilidad y transición energética. Para consolidar estos esfuerzos, es esencial desarrollar estrategias que maximicen la valorización de las reducciones de emisiones, permitiendo que el proyecto no solo sea financieramente viable, sino que también juegue un papel clave en la mitigación del cambio climático.

En lo que respecta a los trabajos futuros, el modelo desarrollado presenta un marco robusto para la optimización de la localización de biorrefinerías y el aprovechamiento de biomasa residual, pero también abre múltiples oportunidades para futuras investigaciones y mejoras. En primer lugar, sería fundamental incorporar la integración de mercados con demanda variable, lo que permitiría evaluar cómo se comporta el sistema bajo fluctuaciones en la demanda de bioproductos como las NPS, ligninas o biochar. Este enfoque no solo aportaría mayor realismo al modelo, sino que también mejoraría su flexibilidad para adaptarse a cambios en las condiciones del mercado y garantizar ingresos sostenibles a largo plazo.

Asimismo, aunque el modelo actual asume un punto de origen (no solo provenientes del campo) para cada región productora de biomasa, futuros estudios deberían considerar múltiples puntos de recolección distribuidos dentro de cada región. Esto permitiría capturar mejor las dinámicas logísticas locales, optimizando los costos de transporte y reduciendo las emisiones generadas durante la recolección de biomasa. Además, esto facilitaría el análisis de regiones con alta densidad de producción, donde múltiples puntos de recolección pueden mejorar significativamente la eficiencia del sistema.

Otro aspecto que merece ser explorado es el aprovechamiento de distintos tipos de biomasa y su manejo en diferentes épocas de cosecha. Aunque el modelo está diseñado para trabajar con cualquier tipo de biomasa, no se evaluó su desempeño en sistemas que integren múltiples tipos simultáneamente o en cadenas de suministro sujetas a la estacionalidad. Este tipo de análisis sería especialmente relevante en regiones donde la disponibilidad de biomasa fluctúa a lo largo del año, y donde una planificación adecuada podría garantizar el uso continuo de las biorrefinerías.

Referencias

- Aalto, M., K. Raghu, O.-J. Korpinen, K. Karttunen, and T. Ranta (2019). Modeling of biomass supply system by combining computational methods—a review article. *Applied energy* 243, 145–154.
- Abe, H., Y. Nakayasu, K. Haga, and M. Watanabe (2023). Global Challenges. 7(8), 2300112.
- Alatorre, J. E., K. Caballero, J. Ferrer, and L. M. Galindo (2019). *El costo social del carbono: una visión agregada desde américa latina*.
- Alday, J. G., R. A. Miranda, S. d. Blas Artalejo, C. d. Peso Taranco, M. T. Borregón Carretero, R. Manso González, V. Pando Fernández, J. Puértolas Simón, M. Pardos Minguez, F. Bravo Oviedo, et al. (2012). *La regeneración natural de los pinares en los arenales de la meseta castellana*.
- Alibaba (2025a). *Carbonization coconut shell biochar fertilizer plant price per ton for sale*. Recuperado el 2025-01-23.
- Alibaba (2025b). *High purity 99* Recuperado el 2025-01-23.
- Alibaba (2025c). *Lignina sodafree*. Recuperado el 2025-01-23.
- Alvarado, P., L. Vega, and M. Porras (2013). *Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos*. Revista del Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 86–101.
- Álvarez-López, G., A. M. Múnera, and J. G. Villegas (2023). Sustainability. 15(13), 10031.
- Asim, N., Z. Emdadi, M. Mohammad, M. A. Yarmo, and K. Sopian (2015). *Agricultural solid wastes for green desiccant applications: an overview of research achievements, opportunities and perspectives*. Journal of Cleaner Production 91, 26–35.
- Aslani, L., A. Hasan-Zadeh, Y. Kazemzadeh, and A.-H. Sheikh-Azadi (2024). *Scientific Reports*. 14(1), 13330.
- Atashbar, N. Z., N. Labadie, and C. Prins (2016). *IFAC-PapersOnLine*. 49(12), 604–615.
- Aziz, M. A. and S. S. Shah (2023). *Biomass-Based Supercapacitors: Design, Fabrication and Sustainability*. John Wiley & Sons.

-
- Bazuhair, R. W. (2023). *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. 14(3), 166–171.
- Beeramoole, P. B., R. Kelly, M. M. Haque, A. Pinz, and A. Paz (2024). Estimation of discrete choice models considering simultaneously multiple objectives and complex data characteristics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 160, 104517.
- Berezka, A. and et al. (2021). Modern Achievements in Physics and Engineering. 40(II). Recuperado el January 24, 2025.
- Bisht, N. and N. Rani (2024, Jul.). *Advances in Research*. 25(4), 258–270.
- Brás, I., E. Silva, R. Raimondo, R. Saetta, V. Mignano, M. Fabricino, and J. Ferreira (2024). *Sustainability*. 16(2), 630.
- Bushra, B. and N. Remya (2020). Biomass Conversion and Biorefinery. 14(5), 5759–5770.
- Calderón, S., G. Romero, A. Ordoñez, A. Álvarez, C. E. Ludeña, L. Sanchez-Aragon, C. De Miguel, K. Martínez, and M. Pereira (2014). Impactos económicos del cambio climático en Colombia. *Banco Interamericano de Desarrollo*.
- Cardona, C. A., M. Ortiz-Sanchez, N. Salgado, J. C. Solarte-Toro, C. E. Orrego, A. Perez, C. D. Acosta, E. Ledezma, H. Salas, J. Gonzaga, et al. (2023). *Fermentation*. 9(7), 609.
- Carrier, J., C.-Y. Lai, and D. Radu (2024). Lignin-based platform as a potential low-cost sorbent for the direct air capture of CO₂. *ACS Environmental Au*.
- Carvajal, J. C., Á. Gómez, and C. A. Cardona (2016). Comparison of lignin extraction processes: Economic and environmental assessment. *Bioresource technology* 214, 468–476.
- Castro-Garzón, H., E. J. Contreras, and J. P. Rodríguez (2020). Análisis ambiental: impactos generados por los residuos agrícolas en el municipio de el dorado (meta, colombia). *Revista ESPACIOS. ISSN 798, 1015*.
- Change, I. C. et al. (2014). *Mitigation of climate change*. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 1454, 147.
- Chen, X. and H. Önal (2014). *Transportation Science*. 48(4), 575–591.
- Cherubini, F. (2010). *Energy conversion and management*. 51(7), 1412–1421.
- Chidozie, B., A. Ramos, J. Vasconcelos, and L. P. Ferreira (2024). *Logistics (2305-6290)*. 8(4).

-
- Clavijo-Buritica, N., L. Triana-Sanchez, and J. W. Escobar (2023). A hybrid modeling approach for resilient agri-supply network design in emerging countries: Colombian coffee supply chain. *Socio-Economic Planning Sciences* 85, 101431.
- Correal, M. and A. Laguna (2018). *Estimación de costos de recolección selectiva y clasificación de residuos con inclusión de organizaciones de recicladores: Herramienta de cálculo y estudios de caso en américa latina y el caribe.*
- Cuervo Cruz, R. A., J. Martínez Bernal, and J. A. Orjuela Castro (2021). *Ingeniería*. 26(3), 334–366.
- Dahlquist, E. and J. Bundschuh (2013). *Introduction and context: global biomass resources—types of biomass, quantities and accessibility. biomass from agriculture, forestry, energy crops and organic wastes. In Biomass as Energy Source, (pp. 41–70). CRC Press.*
- DANE (2020). *Encuesta nacional agropecuaria (ENA) 2019. Technical report, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Bogotá, Colombia. Boletín técnico sobre el uso del suelo, producción agropecuaria y otros indicadores relacionados.*
- De Meyer, A., D. Cattrysse, J. Rasinmäki, and J. Van Orshoven (2014). *Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. Renewable and sustainable energy reviews* 31, 657–670.
- Dokl, M., Z. Kravanja, and L. Čuček (2024). Integrated optimization framework for a biomass supply network and steam rankine cycle. *Optimization and Engineering*, 1–35.
- Durán-Aranguren, D., C. Yamakawa, J. Ordeñana, R. Sierra, J. Posada, and S. Mussatto (2025). An experimental cascade biorefinery from orange residues: Sequential recovery of bioactive compounds, pectin, and fermentation of sugar-rich side streams using conventional and non-conventional yeasts. *Biomass and Bioenergy* 193, 107514.
- Durmaz, Y. G. and B. Bilgen (2020). *Multi-objective optimization of sustainable biomass supply chain network design. Applied Energy* 272, 115259.
- Ezeorba, T. P. C., E. S. Okeke, M. H. Mayel, C. O. Nwuche, and T. C. Ezike (2024). Recent advances in biotechnological valorization of agro-food wastes (afw): Optimizing integrated approaches for sustainable biorefinery and circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, 101823.
- Fantini, M. (2017). *Biomass Availability, Potential and Characteristics, (pp. 21–54). Cham: Springer International Publishing.*

-
- FEDELONJAS (2023). Informe de oferta del mercado inmobiliario en Colombia: Septiembre 2023. Accedido: 23 de enero de 2025.
- Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ) (2024, 8). Mayor consumo de arroz en Colombia, símbolo de seguridad alimentaria y tradición.
- Fernandes, I. J., D. Calheiro, A. G. Kieling, C. A. Moraes, T. L. Rocha, F. A. Brehm, and R. C. Modolo (2016). Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy. *Fuel* 165, 351–359.
- García, D. J. and F. You (2015). *Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities*. Computers & Chemical Engineering 81, 153–170.
- Giarola, S., A. Zamboni, and F. Bezzo (2011). *Computers & Chemical Engineering*. 35(9), 1782–1797.
- Gobert, J. (2019). *Tecnoscienza. Italian Journal of Science & Technology Studies*. 10(1), 29–50.
- Gómez Quiceno, J. D., N. Pontón Caro, et al. (2022). Diseño de un modelo logístico para la biomasa residual agrícola y pecuaria en torno a un sistema centralizado de aprovechamiento. Master's thesis, Maestría en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento-Virtual.
- González Velasco, M. N., C. Suárez Roldan, and G. A. Méndez Giraldo (2023). *LACCEI*. 1(8).
- Goswami, L., R. Kayalvizhi, P. K. Dikshit, K. C. Sherpa, S. Roy, A. Kushwaha, B. S. Kim, R. Banerjee, S. Jacob, and R. C. Rajak (2022). A critical review on prospects of bio-refinery products from second and third generation biomasses. *Chemical Engineering Journal* 448, 137677.
- Hazir, M. H. M., R. Daud, M. S. Shahabudin, M. F. Othman, and N. R. A. Hamid (2023). *Canopy reflectance spectra's variability, physical traits' uniqueness and the prediction of rubber clones (hevea brasiliensis)*. Industrial Crops and Products 201, 116930.
- Herer, Y. T., M. Tzur, and E. Yücesan (2006). *IIE transactions*. 38(3), 185–200.
- Hincapié Rojas, D. F., T. R. Romero Rodríguez, D. F. Ortega Solarte, O. Moscoso Londoño, C. L. Londoño Calderón, and A. Lorena Giraldo (2024). Optimization of the extraction and preparation of cellulose microfibrils from rice husk using a full factorial experiment. *Cellulose Chemistry & Technology* 58.

-
- Holder, A., B. Gullett, S. Urbanski, R. Elleman, S. O'Neill, D. Tabor, W. Mitchell, and K. Baker (2017). *Emissions from prescribed burning of agricultural fields in the pacific northwest*. *Atmospheric Environment* 166, 22–33.
- Holub, H., V. Kharuta, O. Zaiats, and M. Tkachuk (2022). *Transport systems and technologies*. (39), 262–268.
- Hu, H., T. Lin, S. Wang, and L. F. Rodriguez (2017). A cybergis approach to uncertainty and sensitivity analysis in biomass supply chain optimization. *Applied energy* 203, 26–40.
- IDEAM, Fundación Natura, P. M. D. C. (2021). *Tercer informe bienal de actualización de colombia a la convención marco de las naciones unidas para el cambio climático (cmnucc)*. *Technical report*, IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM, Bogotá D.C., Colombia.
- IEEE (Ed.) (2024). *Energía y Geoestrategia 2024*. Madrid, España: Instituto Español de Estudios Estratégicos, Comité Español del Consejo Mundial de la Energía, Club Español de la Energía. Depósito Legal M 3928-2014. NIPO 083-18-071-7 (edición en línea), ISSN 2697-2182 (edición en línea).
- IRENA (2024). *Renewable Capacity Statistics 2024*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jana, D. K., S. Bhattacharjee, P. Dostál, Z. Janková, and B. Bej (2022). *Bi-criteria optimization of cleaner biofuel supply chain model by novel fuzzy goal programming technique*. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 4, 100044.
- Janasree, P. and M. K. Kumar (2018). *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 5(8), 314–319.
- Javourez, U., S. Karan, and L. Hamelin (2024). Residual biomasses at scale: Ensuring future bioeconomy uses outperform current baseline. *Science of The Total Environment* 949, 174481.
- John, G., B. Vijai Shankar, S. R. Jadhav, and P. K. Vemula (2010). *Langmuir*. 26(23), 17843–17851.
- Kamm, B. and M. Kamm (2004). *Applied microbiology and biotechnology*. 64(2), 137–145.
- Karimi, K., S. Kheradmandinia, and M. J. Taherzadeh (2006). *Biomass and Bioenergy*. 30(3), 247–253.

-
- Kim, M., S. Jo, J. Woo, and E.-C. Jeon (2021). *Energy & Environment*. 32(8), 1361–1377.
- Kim, S. and Y.-I. Lim (2022). *Economic evaluation and analysis of electricity and nanoporous silica productions from rice husk*. In *Computer Aided Chemical Engineering, Volumen 49*, (pp. 97–102). Elsevier.
- Ko, S., P. Lautala, and R. M. Handler (2018). *Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics*. *Journal of Cleaner Production* 200, 205–218.
- Kordi, M., N. Farrokhi, M. I. Pech-Canul, and A. Ahmadikhah (2024). *Rice Science*. 31(1), 14–32.
- Kristianto, Y. and L. Zhu (2017). *Techno-economic optimization of ethanol synthesis from rice-straw supply chains*. *Energy* 141, 2164–2176.
- Lautala, P. T., M. R. Hilliard, E. Webb, I. Busch, J. Richard Hess, M. S. Roni, J. Hilbert, R. M. Handler, R. Bittencourt, A. Valente, et al. (2015). *Opportunities and challenges in the design and analysis of biomass supply chains*. *Environmental management* 56, 1397–1415.
- Li, Y., F. M. Hagos, R. Chen, H. Qian, C. Mo, J. Di, X. Gai, R. Yang, G. Pan, and S. Shan (2021). *Rice husk hydrochars from metal chloride-assisted hydrothermal carbonization as biosorbents of organics from aqueous solution*. *Bioresources and Bioprocessing* 8, 1–15.
- Lim, C. H. and H. L. Lam (2016). *Biomass supply chain optimisation via novel biomass element life cycle analysis (belca)*. *Applied Energy* 161, 733–745.
- Lim, S.-H., M.-J. Yook, J.-S. Song, J.-W. Kim, C.-J. Zhang, D.-G. Kim, Y.-H. Park, D. Lee, and D.-S. Kim (2021). *Agronomy*. 11(5), 900.
- Liu, L. (2023). *Introduction*, (pp. 1–5). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Lo, S. L. Y., B. S. How, W. D. Leong, S. Y. Teng, M. A. Rhamdhani, and J. Sunarso (2021). *Techno-economic analysis for biomass supply chain: A state-of-the-art review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135, 110164.
- López, P. R., S. G. Galán, N. R. Reyes, and F. Jurado (2008). *International journal of green energy*. 5(3), 199–211.
- Malik, S., P. K. Omre, and S. Sivadas (2024, Jul.). *Archives of Current Research International*. 24(6), 78–84.

-
- Malladi, K. T., O. Quirion-Blais, and T. Sowlati (2018). *Development of a decision support tool for optimizing the short-term logistics of forest-based biomass*. *Applied energy* 216, 662–677.
- Mantilla-Romo, L., Y. Camargo-Caicedo, S. Bolaño-Díaz, F. Tovar-Bernal, and A. Garrido-Galindo (2023). *Atmosphere*. 14(7), 1167.
- Mantovani, B. and H. Gibson (1992). A simulation model for analysis of harvesting and transport costs for biomass based on geography, density and plant location.
- Maronese, S., A. V. Ensinas, A. Mian, A. Lazzaretto, and F. Marechal (2015). *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 54(28), 7038–7046.
- Medina, M. P., D. Villalba, R. Felipe, S. Juan, B. Carrasco, and W. Rodríguez (2016). Factores de emisión considerados en la herramienta de cálculo de la huella de carbono corporativa mvc colombia. *Recuperado de: https://www.acueducto.com.co/wps/html/resources/2018ag/huella_carbono/feb12/18Anejo_17Factores_emision_herramienta_MCV_V6.pdf*.
- MinAmbiente (2019). Estrategia nacional de economía circular: Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio.
- MinAmbiente (2022). Plan de acción para la gestión sostenible de la biomasa residual.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (2018). Infografía Impuesto al Carbono. F-E-SIG-26-V3. Vigencia 18/12/2018.
- Moore, F. C., M. A. Drupp, J. Rising, S. Dietz, I. Rudik, and G. Wagner (2024). Synthesis of evidence yields high social cost of carbon due to structural model variation and uncertainties. Technical report, CESifo.
- Morya, R., T. Raj, Y. Lee, A. K. Pandey, D. Kumar, R. R. Singhanía, S. Singh, J. P. Verma, and S.-H. Kim (2022). Recent updates in biohydrogen production strategies and life-cycle assessment for sustainable future. *Bioresource technology* 366, 128159.
- Muñoz-Muñoz, A., O. Y. Moreno-Moreno, L. d. P. Castro-Molano, H. Escalante-Hernandez, S. Céspedes-Zuluaga, K. Zapata-Acosta, and F. Cortés-Correa (2020). *Revista Ion*. 33(1), 57–66.
- Nasiri, F. and G. Zaccour (2009). *Energy Policy*. 37(11), 4514–4522.

-
- Negri, V., Á. Galán-Martín, C. Pozo, M. Fajardy, D. M. Reiner, N. Mac Dowell, and G. Guillén-Gosálbez (2021). *Life cycle optimization of beccs supply chains in the european union*. *Applied Energy* 298, 117252.
- Nnadiukwu, U. C., E. N. Onyeike, C. C. Ikwuchi, and K. C. Patrick-Iwuanyanwu (2023). *Tropical Journal of Natural Product Research*. 7(2).
- Nwajiaku, I. M., J. S. Olanrewaju, K. Sato, T. Tokunari, S. Kitano, and T. Masunaga (2018). Change in nutrient composition of biochar from rice husk and sugarcane bagasse at varying pyrolytic temperatures. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 7, 269–276.
- Nzereogu, P., A. Omah, F. Ezema, E. Iwuoha, and A. Nwanya (2023). *Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications*. *Hybrid Advances*, 100111.
- Ogunrewo, O. F. and N. I. Nwulu (2024). *Optimizing biomass supply chains: A probabilistic approach to managing uncertainties in southwest nigeria*. *Cleaner Engineering and Technology* 22, 100785.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2018, abril). Seguimiento del mercado del arroz. Resumen de mercado del arroz con análisis de comercio internacional, utilización y precios mundiales.
- Ortiz-Sanchez, M., S. Piedrahita-Rodríguez, J. C. Solarte-Toro, K. Moustakas, and C. A. Cardona Alzate (2024). Sustainability analysis of biorefineries applying biotechnological routes to convert bagasse from non-centrifugal sugar production for rural economic development in colombia. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–23.
- Panichelli, L. and E. Gnansounou (2008). *Biomass and Bioenergy*. 32(4), 289–300.
- Pantaleo, A. M., S. Giarola, A. Bauen, and N. Shah (2014). Integration of biomass into urban energy systems for heat and power. part i: An milp based spatial optimization methodology. *Energy Conversion and Management* 83, 347–361.
- Pardo Cuervo, O. H., C. A. Rosas, and G. P. Romanelli (2024). *Environmental Science and Pollution Research*. 31(32), 44575–44607.
- Parlamento Europeo (2023). *Cambio climático: gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global*. Consultado el 22 de enero de 2025.

-
- Patel, R., T. Rajaraman, P. Rana, N. Ambegaonkar, and S. Patel (2025). *A review on techno-economic analysis of lignocellulosic biorefinery producing biofuels and high-value products*. *Results in Chemistry*, 102052.
- Pereira, E. and R. Martínez (2024). *Producción de biochar a partir de cascarilla de arroz implementando un gasificador de flujo ascendente*.
- Prada, A. and C. E. Cortés (2010). *La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral*. *Orinoquia* 14, 155–170.
- Qian, T., M. Ooba, M. Fujii, T. Matsui, C. Haga, A. Namba, and S. Nakamura (2024). *Remote Sensing*. 16(4), 706.
- Razik, A. H. A., C. S. Khor, and A. Elkamel (2019). *A model-based approach for biomass-to-bioproducts supply chain network planning optimization*. *Food and Bioproducts Processing* 118, 293–305.
- Rentizelas, A. (2013). *2 - biomass supply chains*. In L. Rosendahl (Ed.), *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, *Woodhead Publishing Series in Energy*, (pp. 9–35). *Woodhead Publishing*.
- Rentizelas, A. A. and I. P. Tatsiopoulos (2010). *International Journal of Production Economics*. 123(1), 196–209.
- Rodríguez, C. P. P., L. A. Ríos, C. S. D. González, A. Montaña, and C. G. Marroquín (2023). *Palmas*. 44(1), 65–82.
- Rodriguez, V. E. O., B. E. Morales, J. M. M. Contreras, N. A. V. Cantú, A. A. Lassman, and E. S. R. Mendoza (2024). *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*. 3(1), 105–110.
- Rodríguez Granados, R., J. Trujillo, and A. C. León Rincón (2023). *Módulo 1: Mercados de carbono. Kit de cartillas didácticas del proyecto Fortalecimiento de la gobernanza de los macroterritorios de los pueblos indígenas del nororiente amazónico como fundamento para la construcción de una paz estable y duradera*.
- Saldanha-da Gama, F. (2022). *Facility location in logistics and transportation: An enduring relationship*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 166, 102903.

-
- Sanchez, N., M. Cobo, D. Rodríguez-Fontalvo, R. Y. Ruiz-Pardo, and A. Roedl (2024). Unlocking sustainable solutions: Harnessing residual biomass from colombia's non-centrifugal sugar chain for green market deployment. *Bioresource Technology Reports* 26, 101858.
- Sanchita, N. and D. Mira (2024). *Study of agro-waste biorefineries for circular bio-economy*. Prospects of Science, Technology and Applications, 52.
- Santos, D. S., T. F. Ianda, P. P. S. de Carvalho, P. L. T. de Camargo, F. C. G. dos Santos, C. A. C. Alzate, F. L. P. Pessoa, and R. de Araújo Kalid (2024). Environment, Development and Sustainability. 26(5), 10865–10925.
- Sbarciog, M., V. De Buck, S. Akkermans, S. Bhonsale, M. Polanska, and J. F. Van Impe (2022). Processes. 10(5), 829.
- Schwartz, N. R., A. D. Paulsen, M. J. Blaise, A. L. Wagner, and P. E. Yelvington (2020). Analysis of emissions from combusting pyrolysis products. Fuel 274, 117863.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2025). Monografías. Consultado el 22 de enero de 2025.
- Shabani, N., S. Akhtari, and T. Sowlati (2013). Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, 299–311.
- Shahbeik, H., H. K. S. Panahi, M. Dehghani, G. J. Guillemin, A. Fallahi, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, H. Amiri, M. Rehan, D. Raikwar, H. Latine, et al. (2024). Biomass to biofuels using hydrothermal liquefaction: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 189, 113976.
- Shahbeik, H. and W. Peng (2024). *Planetary Sustainability*. 2(1), 35–53.
- Sharma, B., R. G. Ingalls, C. L. Jones, and A. Khanchi (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 608–627.
- Singh, N., S. B. Gautam, G. M. Sawood, V. L. Yadav, G. Mishra, S. Dixit, and S. Gupta (2024). Bioenergy from agro-waste: A sustainable solution for energy needs. In Sustainable Clean Energy Production Using Waste Biomass: Sustainable Energy Production and Utilization, (pp. 207–249). Springer.
- Siol, C., D. Thrän, and S. Majer (2023). Utilizing residual biomasses from agriculture and forestry: Different approaches to set system boundaries in environmental and economic life-cycle assessments. *Biomass and Bioenergy* 174, 106839.

-
- Speight, J. G. (2022). Chapter 2 - biomass. In J. G. Speight (Ed.), *Biomass Processes and Chemicals*, (pp. 45–94). Elsevier.
- Srivastava, A. P. and B. K. Pandey. Biomass energy: A crucial component in the renewable energy mix.
- Stellingwerf, H. M., X. Guo, E. Annevelink, and B. Behdani (2022). Logistics and supply chain modelling for the biobased economy: A systematic literature review and research agenda. *Frontiers in Chemical Engineering* 4, 778315.
- Torres-Morales, E., D. Khatiwada, M. Xylia, and F. X. Johnson (2023). *Investigating biochar as a net-negative emissions strategy in colombia: Potentials, costs, and barriers*. Current Research in Environmental Sustainability 6, 100229.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2010). Biomasa, fuente renovable de energía. Anexo A, documento sobre la dinámica de la biomasa y su aprovechamiento energético.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2021). Factores de emisión de los combustibles colombianos (FECOC+). Fase 2.1: Determinación de los factores de emisión de vehículos de carga (camiones y tractocamiones) a la altura del área metropolitana de Bucaramanga.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2022). Factores de emisión de los combustibles colombianos (FECOC+). Fase 2.2: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud de Bogotá y Barranquilla.
- UPME (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Bogotá, Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Incluye glosario e índice temático. 178 páginas.
- Uslu, A., A. P. Faaij, and P. C. Bergman (2008). *Energy*. 33(8), 1206–1223.
- Van Dyken, S., B. H. Bakken, and H. I. Skjelbred (2010). *Energy*. 35(3), 1338–1350.
- Vargas, S. C. G. (2020, Diciembre). Evaluación de las medidas de mitigación de contaminantes climáticos de vida corta en Colombia: Recomendaciones para la actualización de la ndc. Realizado en el marco del contrato No. 2500238039.

-
- Wagh, M. S., S. Sowjanya, P. C. Nath, A. Chakraborty, R. Amrit, B. Mishra, A. K. Mishra, and Y. K. Mohanta (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: circular bioeconomy and biorefinery process—a sustainable symphony. *Process Safety and Environmental Protection*.
- Wang, X. T., J. X. Cao, and Y. Lv (2024). Resource allocation and route planning under the collection price uncertainty for the biomass supply chain. *Biosystems Engineering* 241, 68–82.
- Ye, H. Y. (2024). *The transformation of biomass to bio-nature gas, principles and future development trends*. Highlights in Science, Engineering and Technology 83, 790–795.
- Zahraee, S. M., S. R. Golroudbary, N. Shiwakoti, P. Stasinopoulos, and A. Kraslawski (2020). Water-energy nexus and greenhouse gas–sulfur oxides embodied emissions of biomass supply and production system: A large scale analysis using combined life cycle and dynamic simulation approach. *Energy Conversion and Management* 220, 113113.
- Zahraee, S. M., N. Shiwakoti, and P. Stasinopoulos (2020). *Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward*. Biomass and Bioenergy 142, 105777.
- Zandi Atashbar, N., N. Labadie, and C. Prins (2018a). A model to locate and supply bio-refineries in large-scale multi-biomass supply chains. In *Operations Research Proceedings 2016: Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society (GOR), Helmut Schmidt University Hamburg, Germany, August 30-September 2, 2016*, (pp. 357–363). Springer.
- Zandi Atashbar, N., N. Labadie, and C. Prins (2018b). *International Journal of Production Research*. 56(10), 3482–3506.
- Zhu, X., L. E. Healy, C. Sullivan, D.-W. Sun, U. Tiwari, J. Curtin, and B. K. Tiwari (2023). Chapter 21 - biorefinery. In B. K. Tiwari and L. E. Healy (Eds.), *Future Proteins*, (pp. 447–468). Academic Press.

Anexos

Anexo 1. Resultados del modelo

En el siguiente enlace encontraran los resultados obtenidos en la realización del proyecto para todos los casos planteado:

https://drive.google.com/drive/folders/1q6ScNhIhjQjYJyq_rUoFNcjC9QspCQrf?usp=sharing