



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

# Gestión logística de residuos de la agro-industria para valorización energética en Uruguay

## **Autores**

Gambetta, Mauro

Guchin, Iván

Lagarmilla, Milena

Proyecto presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero de Producción.

## **Tutores**

Ferrari, Adrián

Gutiérrez, Soledad

Huelmo, Darío

Montevideo, Uruguay

Marzo, 2026



## Resumen Ejecutivo

La descarbonización del sector industrial requiere aprovechar con eficiencia los recursos de biomasa residual disponibles. En Uruguay, la dispersión geográfica de estos residuos y su baja densidad aparente encarecen el transporte, limitando la competitividad de su valorización energética. El presente trabajo aborda el diseño de la cadena logística óptima para la recolección, pretratamiento y valorización energética por vía térmica de residuos agroindustriales y forestales, evaluando la incorporación de instalaciones de densificación fijas y móviles como mecanismo para reducir costos de transporte y ampliar la base de captación de biomasa.

Se desarrolló un modelo de programación no lineal entera mixta, determinístico y multiperíodo, que optimiza simultáneamente la localización de la planta final de valorización energética, la selección de puntos de generación activos, las rutas de transporte y las decisiones de apertura de plantas de densificación intermedias, fijas o móviles, a lo largo de un horizonte de planificación de doce meses. El caso de estudio se sitúa en el corredor noreste de Uruguay, entre los departamentos de Tacuarembó y Rivera, con la Ruta Nacional N°5 como eje central. Se consideraron 22 puntos de generación (18 aserraderos, 2 frigoríficos y 2 molinos arroceros), 5 localizaciones candidatas para la planta final de valorización energética, 16 nodos candidatos para plantas de densificación fija y hasta 4 unidades móviles. Las tecnologías de densificación evaluadas fueron briquetado, peletizado y triturado.

Tomando como referencia una planta local de características similares, se adoptaron los siguientes supuestos: un precio de venta de la energía eléctrica de USD 78/MWh; un costo operativo de la planta final de USD 46,3/ton de biomasa procesada, parámetro de alta incidencia en los resultados dado que esta operación representa aproximadamente el 45% del costo total del sistema; y un costo de inversión compuesto por un componente fijo de USD 76.449/mes por planta y un componente variable de USD 8,261/ton, asumiendo una vida útil de 20 años y una eficiencia energética del 28%. Para la planta de densificación fija se adoptó un costo de operación de 31,84 USD/ton y valores de inversión equivalentes a USD 2.243/mes por planta y USD 0,536/ton procesada, suponiendo una vida útil de 10 años. En el transporte, se consideró un conjunto tractor-semirremolque con capacidad de 48 toneladas y 96 m<sup>3</sup>, con costos de mantenimiento y combustible de USD 0,075/km y USD 0,339/km, respectivamente, además de un costo de conductor de USD 17,50/h. El costo de adquisición para las tres biomásas es de 30 USD/ton.

La solución óptima corresponde al escenario de briquetado, que incorpora una planta de densificación fija a la altura de la ciudad de Tranqueras y una planta final de valorización en el departamento de Tacuarembó, ambas sobre la Ruta N°5. El sistema procesa 200.160 toneladas anuales provenientes de 18 aserraderos, generando 276.954 MWh con un margen neto de USD 5,77/MWh y una ganancia neta de USD 1.596.662 en el horizonte analizado. La superioridad del briquetado sobre las alternativas no reside en su eficiencia energética directa, sino en el efecto de habilitación logística que genera; la planta de densificación intermedia permite incorporar al mayor generador de biomasa del sistema, inaccesible desde las demás configuraciones de red. El análisis de sensibilidad revela que el precio de venta de energía es un parámetro crítico, con un margen de tolerancia de apenas el 8%, mientras que la densificación móvil no resulta viable bajo las condiciones actuales del mercado.

Más allá de los resultados específicos del caso analizado, que dependen directamente de los parámetros adoptados, el principal aporte de este trabajo es el propio modelo de optimización. Su formulación es general y configurable, lo que permite aplicarlo a otras zonas del país, a distintos tipos de residuos o a diferentes condiciones de mercado sin necesidad de reformular su estructura matemática. Para avanzar hacia etapas de desarrollo futuro, se sugiere profundizar en la estimación detallada de los parámetros críticos identificados, en particular el costo operativo de la planta de valorización, la vida útil de las instalaciones y el factor de conversión energética del briquetado, cuyas variaciones mostraron mayor incidencia sobre la viabilidad del sistema.

**Palabras clave:** biomasa residual, logística de biomasa, optimización, MILP, densificación, cadena de suministro, valorización energética, Uruguay.



## **Agradecimientos**

En primer lugar, queremos expresar un especial agradecimiento a nuestros tutores Adrián Ferrari, Soledad Gutiérrez y Darío Huelmo quienes nos acompañaron a lo largo del Proyecto, aportando su orientación, motivación y experiencia.

A todos los docentes de la carrera, quienes a lo largo de la formación nos transmitieron conocimientos y experiencias fundamentales, contribuyendo con nuestro crecimiento académico y profesional.

A la University of Sheffield de Reino Unido, por brindar el espacio para la presentación y discusión de este trabajo en el congreso ESCAPE36, y por la oportunidad de intercambio con la comunidad académica y profesional.

Por último, pero no menos importante, queremos agradecerle profundamente a nuestra familia y amigos, por el apoyo incondicional durante toda la carrera, especialmente en las etapas de mayor dedicación y esfuerzo.



# Índice

<b>Índice</b> .....	<b>6</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>8</b>
<b>Índice de Tablas</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>12</b>
1.1. Problema y motivación.....	12
1.2. Objetivos.....	12
1.3. Estructura del documento.....	12
<b>2. Marco Teórico</b> .....	<b>14</b>
2.1. Residuos agroindustriales y biomasa residual.....	14
2.2. Biomasa residual en Uruguay.....	15
2.3. Métodos de densificación.....	27
2.4. Densificación móvil.....	30
2.5. Transporte y logística.....	32
2.6. Valorización de residuos.....	37
2.7. Fundamentos de modelado matemático.....	38
<b>3. Caso de Estudio</b> .....	<b>42</b>
3.1. Residuos considerados.....	42
3.2. Zona de estudio.....	42
3.3. Red logística.....	45
3.4. Síntesis del caso de estudio.....	49
3.5. Supuestos.....	49
<b>4. Modelo Matemático</b> .....	<b>52</b>
4.1. Formulación matemática.....	52
4.2. Relevamiento y generación de datos.....	63
4.3. Implementación computacional.....	63
4.4. Validación del modelo.....	64
<b>5. Análisis de Resultados</b> .....	<b>66</b>
5.1. Análisis de la solución obtenida.....	66
5.2. Análisis de sensibilidad.....	71
<b>6. Conclusiones</b> .....	<b>80</b>
6.1. Trabajos futuros.....	81
<b>7. Bibliografía</b> .....	<b>82</b>
<b>8. Anexos</b> .....	<b>94</b>
Anexo I.....	94
Anexo II.....	96
Anexo III.....	97
Anexo IV.....	98
Anexo V.....	99
Anexo VI.....	100
Anexo VII.....	108
Anexo VIII.....	109
Anexo IX.....	110



## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Mapa de distribución geográfica de frigoríficos en Uruguay.....	16
<b>Figura 2.2.</b> Proceso de faena de bovinos y principales flujos de residuos.....	17
<b>Figura 2.3.</b> Mapa de distribución geográfica de molinos arroceros en Uruguay.....	19
<b>Figura 2.4.</b> Mapa de distribución geográfica de cultivos cerealeros e industriales 2011.....	21
<b>Figura 2.5.</b> Gráfico de superficie y producción en cultivos temporada 2024/2025.....	21
<b>Figura 2.6.</b> Gráfico “Extracción de Madera 2024 por destino productivo”.....	23
<b>Figura 2.7.</b> Distribución geográfica de aserraderos en Uruguay.....	23
<b>Figura 2.8.</b> Superficie forestada 1981-2023.....	25
<b>Figura 2.9.</b> Cartografía Forestal Nacional 2024, Uruguay.....	26
<b>Figura 2.10.</b> Distribución geográfica de rutas habilitadas para 48 tons.....	34
<b>Figura 2.11.</b> Corredores viales autorizados (verde) y posibles a autorizar (rojo) para bitrenes y tritrenes.....	35
<b>Figura 2.12.</b> Mapa de la Red Ferroviaria de Uruguay.....	36
<b>Figura 3.1.</b> Mapa con puntos de generación y zonas con mayor potencial energético.....	44
<b>Figura 3.2.</b> Puntos de generación del modelo.....	46
<b>Figura 3.3.</b> Distribución geográfica de los puntos de generación.....	46
<b>Figura 4.1.</b> Esquema conceptual del modelo.....	63
<b>Figura 5.1.</b> Localización de las plantas seleccionadas y puntos de generación activos.....	67
<b>Figura 5.2.</b> Flujos de transporte de biomasa.....	67
<b>Figura 5.3.</b> Distribución porcentual de costos (horizonte anual).....	69
<b>Figura 5.4.</b> Análisis de sensibilidad de solución óptima frente a variaciones en parámetros.....	72
<b>Figura 5.5.</b> Costo de transporte según velocidad media de circulación.....	77
<b>Figura 8.1.</b> Pseudocódigo del algoritmo de máxima dispersión geográfica para la selección de ubicaciones candidatas para plantas de densificación.....	98
<b>Figura 8.2.</b> Pseudocódigo para la incorporación de puntos de generación como ubicaciones candidatas adicionales para plantas de densificación.....	98



## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Resumen de características de residuos.....	27
<b>Tabla 3.1.</b> Resultado de estudio de zonas.....	45
<b>Tabla 3.2.</b> Padrones seleccionados del análisis para la localización de la planta final.....	48
<b>Tabla 3.3.</b> Principales valores del caso de estudio.....	49
<b>Tabla 4.1.</b> Conjuntos del modelo.....	52
<b>Tabla 4.2.</b> Parámetros del modelo.....	53
<b>Tabla 4.3.</b> Variables del modelo.....	55
<b>Tabla 4.4.</b> Variables dependientes del modelo.....	55
<b>Tabla 5.1.</b> Métricas principales de la solución óptima (horizonte anual).....	66
<b>Tabla 5.2.</b> Flujos de biomasa por punto de generación.....	68
<b>Tabla 5.3.</b> Comparación de métricas principales entre tecnologías de densificación (horizonte anual)...	70
<b>Tabla 5.4.</b> Ganancia neta anual por apertura de planta de densificación.....	71
<b>Tabla 5.5.</b> Umbrales de inviabilidad del modelo según parámetros críticos.....	75
<b>Tabla 5.6.</b> Impacto en la función objetivo por incorporar puntos de generación.....	76
<b>Tabla 5.7.</b> Costos anuales de transporte según variaciones del tiempo de carga y descarga.....	78
<b>Tabla 8.1.</b> Datos de rastros de cultivo.....	94
<b>Tabla 8.2.</b> Fuentes de datos de tabla.....	95
<b>Tabla 8.3.</b> Costo de operación planta final Galofer.....	101
<b>Tabla 8.4.</b> Costo de operación planta final.....	101
<b>Tabla 8.5.</b> Inversión total por máquina.....	105
<b>Tabla 8.6.</b> Parámetro de inversión densificadora móvil amortizado.....	105
<b>Tabla 8.7.</b> Costo de operación del peletizado móvil.....	106
<b>Tabla 8.8.</b> Desglose de costos del horizonte de planificación.....	109
<b>Tabla 8.9.</b> Análisis de sensibilidad para briquetado.....	110
<b>Tabla 8.10.</b> Análisis de sensibilidad para peletizado.....	110
<b>Tabla 8.11.</b> Análisis de sensibilidad para triturado.....	110



# 1. Introducción

La transición energética y la descarbonización del sector industrial constituyen uno de los principales desafíos energéticos de la actualidad. Si bien Uruguay ha construido una matriz energética con un alto componente renovable, posicionándose como referente a nivel regional, las emisiones de dióxido de carbono asociadas a este sector continúan siendo significativas y constituyen un foco prioritario de reducción. En este contexto, la valorización energética de residuos biomásicos, abundantes en el sector forestal, agrícola-ganadero y agroindustrial, surge como una alternativa de alto potencial, al contribuir tanto a la sustitución de combustibles fósiles como al aprovechamiento de recursos disponibles. El presente trabajo aborda esta problemática desde una perspectiva de optimización logística, con foco en el diseño eficiente de cadenas de suministro de biomasa residual en Uruguay.

## 1.1. Problema y motivación

El aprovechamiento de la biomasa enfrenta un obstáculo logístico a considerar, su dispersión geográfica y su baja densidad encarecen el transporte a tal punto que, en estudios de caso realizados en Uruguay, el costo de traslado puede quintuplicar el valor de la materia prima (González Sotelo et al., 2024). Este cuello de botella condiciona la viabilidad económica de las alternativas basadas en biomasa y vuelve imprescindible evaluar estrategias logísticas y esquemas de pretratamiento que permitan optimizar el manejo y transporte del recurso. En este marco, el presente trabajo se inserta en el proyecto “Evaluación estratégica y tecno-económica de la descarbonización industrial en Uruguay”, presentado ante la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) en el programa Fondo Sectorial de Energía.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es evaluar y diseñar estrategias logísticas eficientes para la gestión y valorización de biomasa residual proveniente del sector forestal y agroindustrial, considerando la reducción de costos de transporte y el aprovechamiento energético del recurso.

Para cumplir con este objetivo, se propone:

- Analizar el problema logístico asociado a la biomasa residual, considerando su dispersión territorial y sus características físicas.
- Explorar estrategias de densificación como mecanismo para reducir costos de transporte y mejorar las propiedades del recurso.
- Definir un caso de estudio representativo para Uruguay, incluyendo puntos de generación de biomasa, localizaciones candidatas para plantas y tecnologías de densificación.
- Desarrollar un modelo matemático de optimización para diseñar y evaluar configuraciones de la cadena logística del caso de estudio.
- Realizar análisis de sensibilidad sobre parámetros relevantes, con el fin de identificar variables críticas y condiciones de implementación.

Se espera que este trabajo constituya un punto de partida para etapas posteriores de prefactibilidad, planificación e implementación. Asimismo, se busca que la metodología propuesta sea replicable y adaptable a casos de estudio similares.

## 1.3. Estructura del documento

El documento se organiza en ocho capítulos. El presente capítulo introduce el contexto y la motivación del problema, y plantea los objetivos del trabajo. El Capítulo 2 desarrolla el marco teórico, donde se describen los principales residuos agroindustriales disponibles en Uruguay, los métodos de densificación fijos y móviles, aspectos de transporte y logística en cadenas de suministro, el proceso

de valorización energética de residuos y una revisión bibliográfica sobre modelado matemático aplicado a este tipo de problemas. El Capítulo 3 presenta el caso de estudio, detallando los residuos considerados, la zona geográfica de análisis y la red logística considerada. El Capítulo 4 expone el modelo matemático propuesto, incluyendo su formulación, el relevamiento y la generación de datos, la implementación computacional y el proceso de validación. El Capítulo 5 presenta y analiza los resultados obtenidos, incorporando un análisis de sensibilidad sobre parámetros y configuraciones de red. Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo y proponen líneas de trabajo futuras. El documento se completa con el Capítulo 7 sobre la bibliografía consultada y culmina con los anexos con información complementaria en el Capítulo 8.

## **2. Marco Teórico**

El presente capítulo presenta los fundamentos conceptuales y el estado del arte que sustentan el trabajo. En primer lugar, se caracterizan los principales tipos de biomasa residual disponibles en Uruguay y su potencial de valorización energética. A continuación, se describen las tecnologías de densificación consideradas, junto con aspectos relevantes del transporte y la logística de biomasa. Finalmente, se presentan los fundamentos del modelado matemático de optimización y una revisión de antecedentes bibliográficos sobre diseño de cadenas de suministro de biomasa, incluyendo casos de aplicación en contextos similares al del presente trabajo.

### **2.1. Residuos agroindustriales y biomasa residual**

La biomasa residual se define como la fracción orgánica biodegradable generada como residuo o subproducto de diversas actividades humanas, excluyendo la biomasa producida específicamente con fines energéticos. En términos generales, comprende materiales orgánicos de origen vegetal o animal que permanecen luego de aprovechar el producto principal de una actividad agrícola, forestal, industrial o urbana. Esta definición es consistente con la establecida en la Directiva 2003/30/CE de la Unión Europea, que incluye “la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de la agricultura, incluidas las sustancias de origen vegetal y animal, de la silvicultura y actividades conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales” (MIEM, 2022a).

Las corrientes de biomasa residual pueden clasificarse según el sector que las genera. A continuación, se describen las más relevantes.

#### **2.1.1. Biomasa residual forestal**

La biomasa residual forestal se origina en actividades silvícolas y en la industria de la madera. Comprende los residuos generados durante las operaciones de tala y poda de bosques y plantaciones, así como los subproductos provenientes de aserraderos y plantas de celulosa. Una gran parte de estos materiales permanece en el sitio de cosecha para favorecer la reincorporación de nutrientes al suelo, mientras que otra fracción puede destinarse a usos energéticos. Debido a su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, presenta un alto potencial para su valorización energética y para la producción de biocombustibles avanzados (Gutiérrez et al., 2017).

#### **2.1.2. Biomasa residual agrícola**

La biomasa residual agrícola se genera en la producción agropecuaria primaria. Comprende los residuos de actividades de cultivo y cosecha, así como los subproductos derivados de la producción animal. Entre los ejemplos más representativos se encuentran la paja de cereales (trigo, arroz y cebada), el rastrojo de maíz y soja tras la cosecha del grano, los restos de poda de frutales y el estiércol producido en establos o feedlots.

Una parte de estos materiales permanece en el campo como cobertura y aporte de materia orgánica al suelo, mientras que los residuos pecuarios suelen aplicarse como fertilizante orgánico. No obstante, cuando su manejo es inadecuado, pueden generar emisiones de metano y contaminación de aguas (Gutiérrez et al., 2017; Emmer et al., 2017).

#### **2.1.3. Biomasa residual agroindustrial**

La biomasa residual agroindustrial se origina en las industrias de procesamiento agropecuario y alimentario, y comprende los subproductos orgánicos generados tras la transformación industrial de materias primas agrícolas, ganaderas o forestales. En industrias de origen vegetal, se incluyen residuos como el bagazo de caña de azúcar, la cáscara de arroz y los orujos y pulpas de frutas. En las de origen

animal, destacan los residuos de frigoríficos, como lodos, grasas y contenidos ruminales, los sueros de leche en la industria láctea y los residuos de curtiembres.

A diferencia de las corrientes forestales y agrícolas primarias, estos residuos suelen generarse en puntos centralizados y en volúmenes significativos, concentrados geográficamente cerca de polos productivos (Gutiérrez et al., 2017; Emmer et al., 2017). Algunos presentan ya cierto grado de aprovechamiento, el bagazo de caña, por ejemplo, se utiliza habitualmente para la generación de energía en sitio.

#### **2.1.4. Biomasa residual urbana**

La biomasa residual urbana corresponde a la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) y de otras corrientes residuales municipales. Incluye principalmente restos domésticos biodegradables, lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales y ciertos residuos orgánicos comerciales.

Este tipo de biomasa suele ser muy heterogénea y presentar un alto contenido de humedad. Tradicionalmente, la mayor parte se dispone en vertederos, donde su degradación genera emisiones de metano hacia la atmósfera, lo que constituye un problema ambiental de relevancia.

En el siguiente capítulo se analiza la disponibilidad y las características específicas de estas corrientes en el contexto uruguayo, identificando las fuentes de mayor relevancia para el presente trabajo.

## **2.2. Biomasa residual en Uruguay**

Uruguay cuenta con una alta dotación de recursos naturales, lo que genera oportunidades para la valorización energética de residuos biomásicos. A efectos de identificar las fuentes de mayor relevancia para este proyecto, se toma como referencia el estudio de Gutiérrez et al. (2017), que considera aquellas biomásas que cumplen uno o varios de los siguientes criterios: generación en cantidades considerables (más de 10.000 toneladas/año), importancia estratégica, concentración geográfica, destino actual de bajo valor agregado y/o composición química de interés para su valorización energética.

Siguiendo estos criterios, las fuentes de biomasa residual identificadas como más relevantes en Uruguay son:

- **Industria frigorífica:** contenido ruminal y otros residuos orgánicos generados durante la faena de ganado bovino.
- **Industria arrocera:** cáscara de arroz obtenida a partir del descascarado del grano.
- **Producción agrícola:** rastrojos de cosecha de cultivos cerealeros y oleaginosos, como rastrojos de soja, trigo y maíz.
- **Industria maderera - aserraderos:** subproductos del procesamiento de madera, incluyendo aserrín, virutas, corteza y recortes.
- **Industria forestal - silvicultura:** biomasa no aprovechada de plantaciones forestales, como ramas, hojas y puntas resultantes de la cosecha de eucaliptos y pinos.

Cada una de estas fuentes se analiza en detalle a continuación.

### **2.2.1. Industria frigorífica**

En Uruguay, la industria frigorífica es uno de los sectores agroindustriales de mayor relevancia económica, distribuida en decenas de establecimientos a nivel nacional. En 2024 operaron 32 plantas frigoríficas habilitadas para bovinos, donde las 10 mayores concentraron alrededor del 70% de la faena anual. Según el informe anual de comercio exterior de Uruguay XXI (2025), la carne bovina ese año fue el segundo rubro de mayor exportación del país, con un valor aproximado de USD 2.026 millones. Asimismo, los datos del Instituto Nacional de Carnes (INAC) registran 2.256.123 cabezas

de ganado bovino faenadas durante 2024, consolidando la especie vacuna como la de mayor volumen de faena en el país (INAC, 2025).

A partir de los registros de faena por establecimiento es posible identificar geográficamente los frigoríficos activos y su contribución al volumen total, información que se utiliza para elaborar la Figura 2.1. que representa el mapa de distribución en el territorio uruguayo.

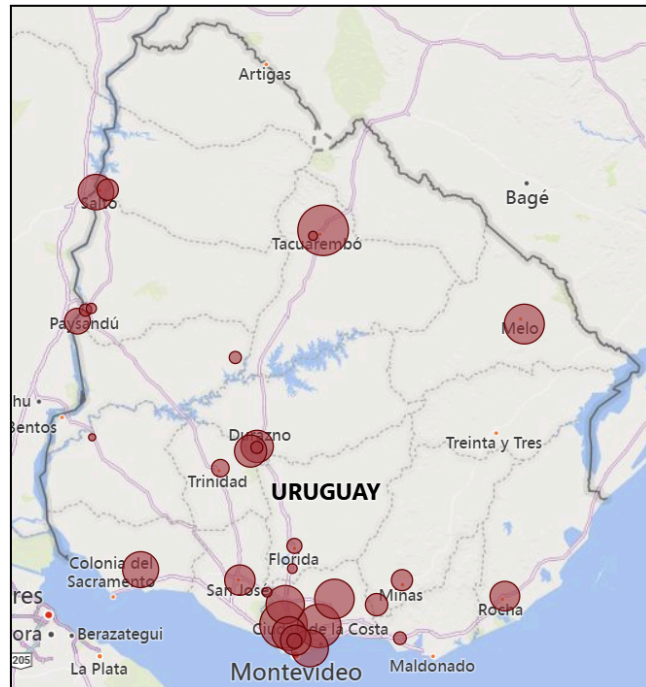


Figura 2.1. Mapa de distribución geográfica de frigoríficos en Uruguay.

El diámetro de los círculos es proporcional al volumen de faena. Fuente: Elaboración propia a partir de INAC (2025).

### 2.2.1.1. Generación de residuos

La faena de bovinos a escala industrial genera diversos productos y subproductos. Los subproductos no comercializables representan más del 50% del peso vivo del animal, aproximadamente la mitad de esta fracción requiere procesamiento o eliminación especial, mientras que la otra mitad posee un valor económico negativo (Da Cunda & Cabrera, 2020).

Durante el proceso de faena se generan grandes cantidades de residuos, tanto sólidos como efluentes líquidos. Desde el punto de vista ambiental, estos últimos tienen especial relevancia y se clasifican típicamente en aguas verdes y aguas rojas (MIEM, 2018). En la Figura 2.2. se presenta un diagrama simplificado del proceso de faena de bovinos, mostrando los principales flujos de residuos generados en un frigorífico típico.

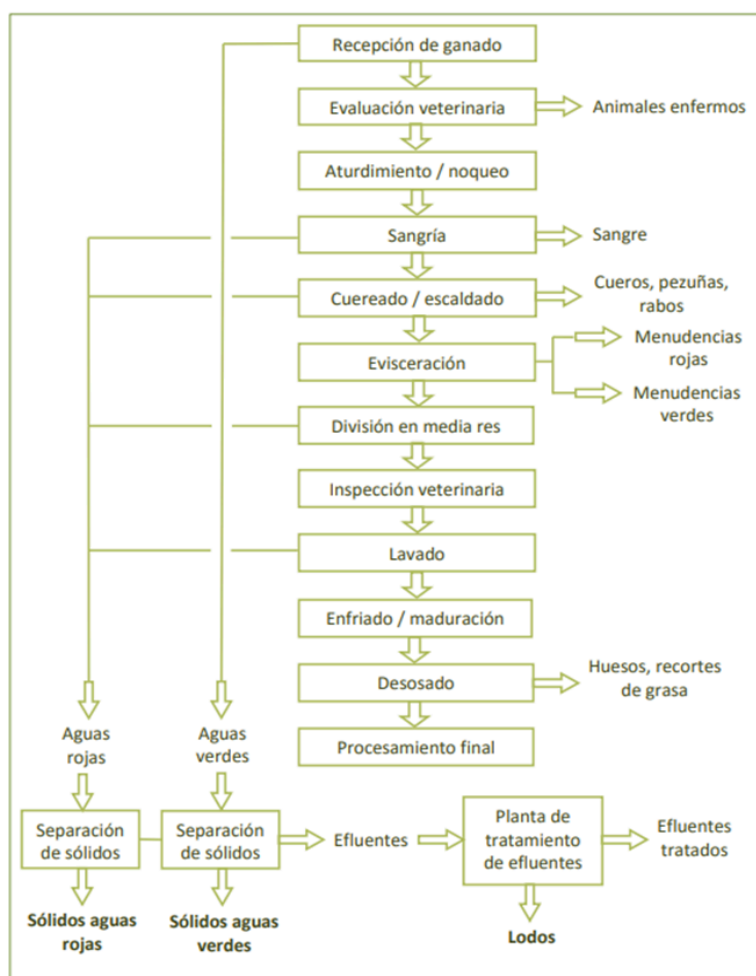


Figura 2.2. Proceso de faena de bovinos y principales flujos de residuos.

Fuente: MIEM – Ministerio de Industria, Energía y Minería (2018).

Las aguas verdes son las corrientes líquidas originadas en el lavado de los corrales y en el lavado de los estómagos e intestinos durante la evisceración. Tras un tratamiento primario de separación sólido-líquido, se obtiene un lodo con alto contenido de material sólido: estiércol, contenido intestinal y contenido ruminal, este último conformado por el material presente en el estómago del animal al momento de la faena (MIEM, 2018). Por otro lado, las aguas rojas se generan durante la propia faena y el lavado, arrastrando principalmente sangre y sólidos de alto contenido lipídico y proteico. Estas corrientes suelen manejarse por separado dada su carga contaminante y su variabilidad (MIEM, 2018).

### 2.2.1.2. Propiedades y potencial energético

Los lodos verdes representan una fuente de biomasa con alto potencial de aprovechamiento debido a su contenido orgánico. En Uruguay, esta corriente fue analizada en el marco del proyecto Biovalor, iniciativa ejecutada entre 2015 y 2019 por ministerios nacionales con apoyo de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), orientada a la valorización de residuos agropecuarios y agroindustriales (ONU Uruguay, 2020).

La ficha técnica elaborada para el sector frigorífico señala que, dado el relativamente alto poder calorífico del contenido ruminal con valores en torno a 2000 kcal/kg (Marulanda-Cataño & Quiroz-Restrepo, 2020), es viable su uso como combustible alternativo en sistemas de generación de energía térmica, sustituyendo parcial o totalmente a combustibles tradicionales (Proyecto Biovalor – MIEM, 2018).

Borzacconi et al. (2015) estiman que se generan aproximadamente 36 kg de contenido ruminal por cabeza bovina faenada. Sin embargo, su alto contenido de humedad puede limitar el rendimiento energético, por lo que se recomienda aplicar pretratamientos de deshidratación y/o secado que reduzcan la humedad y aumenten el valor energético del material.

### **2.2.1.3. Experiencias de valorización**

Un caso relevante de valorización energética en frigoríficos de Uruguay es Ontilcor S.A (Pando, Canelones) donde se implementó un sistema de aprovechamiento energético del contenido ruminal mediante combustión directa en caldera junto con leña. Desde su puesta en marcha en 2019, el sistema valoriza la totalidad del residuo generado en la planta (alrededor de 440 toneladas mensuales), logrando sustituir aproximadamente 1 kg de leña por cada 2 kg de contenido ruminal, manteniendo la producción de vapor requerida. Se estima una reducción anual de 446.516 kg de dióxido de carbono equivalente, asociada tanto al desplazamiento parcial de leña como a la mitigación de emisiones de metano provenientes del contenido ruminal dispuesto sin tratamiento (MIEM, 2025a).

A nivel regional, existen experiencias basadas en digestión anaerobia. El frigorífico ArreBeef (Argentina) produce electricidad desde el año 2021 a partir de residuos orgánicos de faena mediante un biodigestor que alimenta un motor de generación eléctrica conectado a la red, aportando aproximadamente 7.200 MWh/año (Agencia EFE, 2021). Otro ejemplo es un proyecto conjunto entre el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y un frigorífico de Arrecifes (Buenos Aires), que integra digestión anaerobia y compostaje de los sólidos digeridos (Infobae, 2024).

En conjunto, estos antecedentes demuestran la factibilidad técnica y el impacto ambiental positivo del aprovechamiento energético de residuos de frigoríficos, constituyendo referencias relevantes para su implementación en Uruguay.

### **2.2.2. Industria arrocera**

La cadena arrocera uruguaya es un sector de importancia tanto por su escala productiva como por sus exportaciones. La producción de arroz se realiza principalmente bajo riego y se concentra en el norte y este del país (MGAP-OPYPA, 2024). Los molinos que procesan el grano siguen la misma distribución geográfica, como se muestra en la Figura 2.3. En consecuencia, los subproductos generados durante la industrialización, también presentan una concentración territorial definida, lo que facilita la identificación de los principales puntos de generación de biomasa residual de interés para este trabajo.

En los últimos años, Uruguay ha mantenido un alto nivel de productividad en el cultivo de arroz. Para la zafra 2024/2025 se reportó una superficie sembrada cercana a 182.900 ha con un rendimiento promedio de 9.3 ton/ha, resultando en una producción estimada de 1.700.000 toneladas (MGAP-OPYPA, 2025). La estabilidad de estos volúmenes a lo largo de zafras anteriores confirma que se trata de un sector con disponibilidad de residuos predecible y relevante. Además, su fuerte orientación exportadora vuelve cada vez más relevantes los aspectos de sustentabilidad, ante la creciente demanda de prácticas productivas ambientalmente responsables.

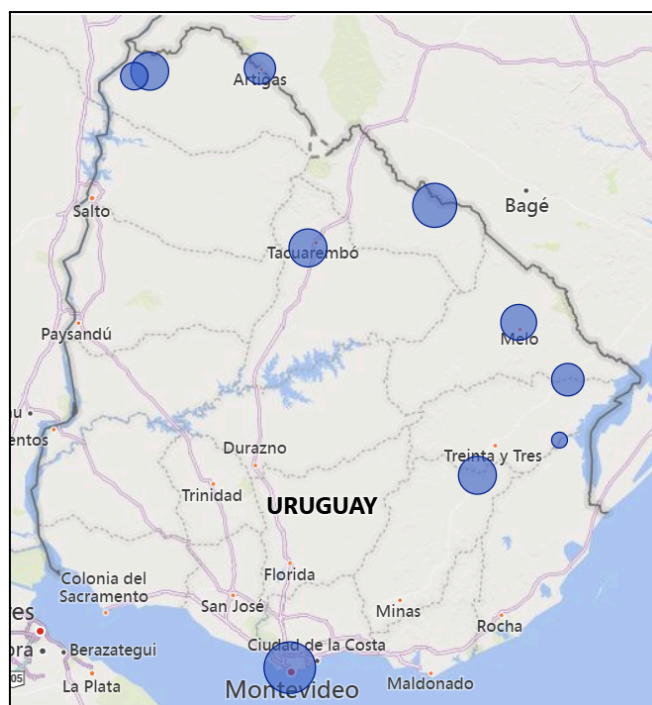


Figura 2.3. Mapa de distribución geográfica de molinos arroceros en Uruguay.

El diámetro de los círculos es proporcional al volumen de producción. Fuente: Elaboración propia a partir de los sitios web de cada molino arrocero.

### 2.2.2.1. Generación de residuos

Cuando el arroz cáscara ingresa al molino atraviesa varias etapas típicas: pre-limpieza, descascarillado, separación del grano integral, y finalmente blanqueo/pulido para obtener arroz blanco comercial. Como resultado se generan distintos subproductos, entre los que se destacan la cáscara de arroz, el salvado y el arroz quebrado.

Para el enfoque de este trabajo, el subproducto de mayor interés es la cáscara de arroz, que se genera durante el descascarillado y representa aproximadamente el 20 % del peso del arroz cáscara (Faroppa, 2010). Su generación se concentra en los molinos, lo que facilita su identificación y cuantificación.

### 2.2.2.2. Propiedades y potencial energético

Desde el punto de vista logístico, la cáscara presenta una baja densidad aparente, del orden de 120 - 130 kg/m<sup>3</sup> (Díaz Tovar, 2019), lo que hace que sea un material muy voluminoso para transportar. Esta característica justifica el análisis de procesos de densificación como estrategia para reducir costos de transporte y mejorar su aprovechamiento.

En términos energéticos, se trata de un residuo lignocelulósico con un poder calorífico del orden de 3.300 kcal/kg, según relevamientos nacionales del MIEM (Faroppa, 2010). Su elevado contenido de sílice permite su aprovechamiento tanto en aplicaciones bioenergéticas como en usos materiales, sin embargo, este mismo contenido puede generar desafíos operativos asociados al manejo de cenizas en procesos de combustión (Zambrano-Zambrano et al., 2021).

### 2.2.2.3. Experiencias de valorización

El uso más común de la cáscara de arroz es su aprovechamiento energético para la generación de energía térmica y/o eléctrica. En Uruguay, un ejemplo representativo es Galofer, planta de cogeneración ubicada en Treinta y Tres que utiliza cáscara de arroz como combustible. Con una

potencia instalada de 14 MWe, registró en 2024 una entrega a red de 66.958 MWh (MIEM, 2022) integrándose al esquema energético-industrial vinculado a molinos arroceros de la zona, como Saman, Arrozur y Coopar. Para el presente trabajo, este antecedente tiene una doble implicancia, por un lado, reduce la disponibilidad de residuo en dichos establecimientos, por otro, confirma la viabilidad técnica de aprovechar la cáscara a escala industrial y con operación sostenida.

Además del uso directo como combustible, la cáscara puede valorizarse mediante su transformación en biocarbón (biochar), con aplicaciones en mejora de suelos, o a través del aprovechamiento de su ceniza, rica en sílice, como insumo en mezclas cementicias y materiales de construcción. Asimismo, es posible extraer fibras celulósicas o recuperar sílice para usos industriales (Zambrano-Zambrano et al., 2021).

### **2.2.3. Cultivos**

Los residuos asociados a cultivos se generan en volúmenes significativos a escala país. Sin embargo, su aprovechamiento no es directo, ya que cumplen funciones agronómicas y presentan gran dispersión territorial.

En cultivos de grano, el residuo predominante es la biomasa aérea (tallos, hojas, vainas, pajas y partes no cosechadas) comúnmente denominada rastrojo. En Uruguay, los más significativos provienen de cultivos cerealeros y oleaginosos como soja, trigo, maíz, sorgo y cebada (Gutiérrez et al., 2017).

Sin embargo, la disponibilidad teórica de rastrojo no coincide con su disponibilidad efectiva. Para estimar cantidades a partir de estadísticas productivas suele utilizarse el índice de cosecha (IC), definido como la relación entre la biomasa cosechada (grano) y la biomasa aérea total. Diversos estudios señalan que sólo una fracción del rastrojo, del orden del 25% al 40%, podría extraerse sin comprometer funciones agronómicas como la reposición de carbono y la conservación de la estructura del suelo (Torres Ripa et al., 2019). En consecuencia, su extracción está sujeta a restricciones ambientales y productivas, además de requerir una logística de recolección compleja y costosa debido a su dispersión.

#### **2.2.3.1. Generación de residuos**

A partir de los datos de Curto et al. (2017), se observa que la mayor superficie sembrada de los principales cultivos cerealeros se concentra en el litoral oeste y suroeste del país, con Soriano y Río Negro como departamentos líderes, acompañados por Colonia y Paysandú según el cultivo (Figura 2.4).

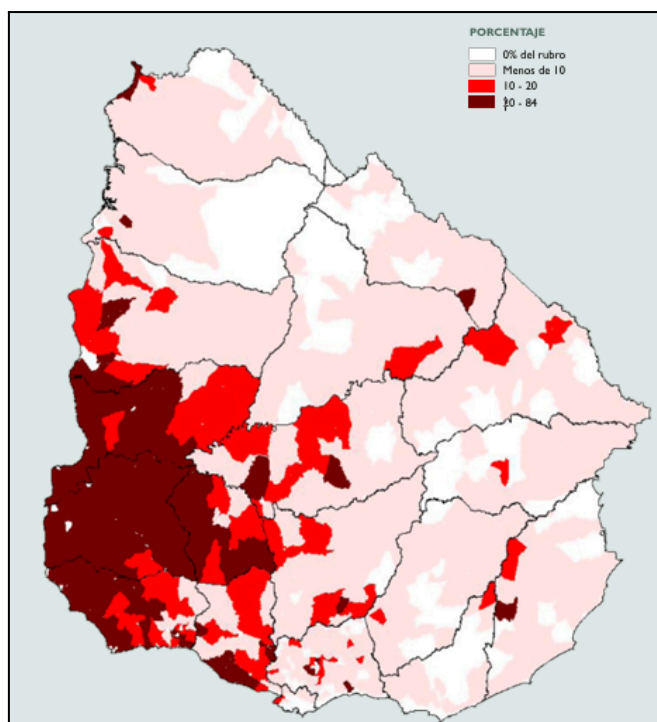


Figura 2.4. Mapa de distribución geográfica de cultivos cerealeros e industriales 2011.  
Fuente: MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (2015).

Para contextualizar la escala actual, el Anuario Estadístico Agropecuario 2025 reporta las superficies y producciones destacadas en cultivos en la temporada 2024/2025 (MGAP-DIEA, 2025), que se presentan en la Figura 2.5.

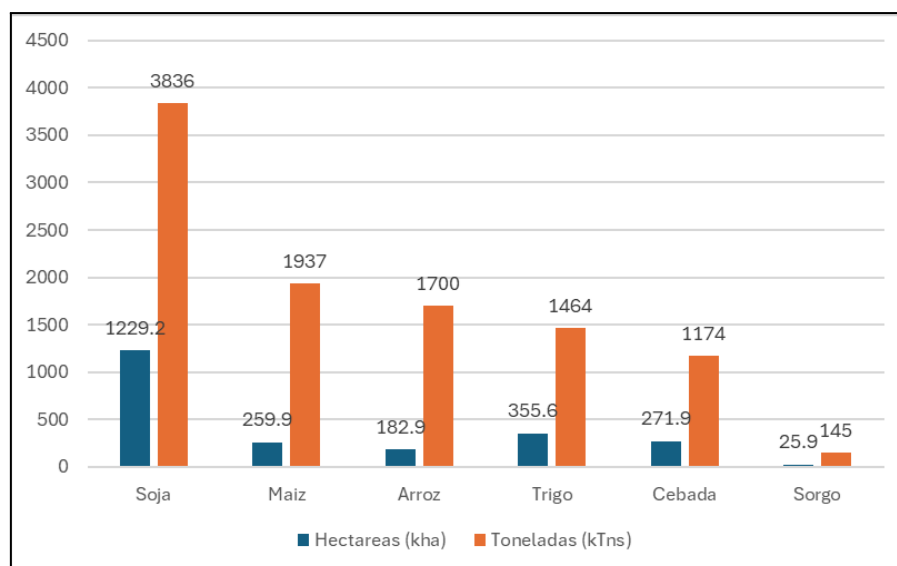


Figura 2.5. Gráfico de superficie y producción en cultivos temporada 2024/2025.  
Fuente: Elaboración propia a partir de MGAP-DIEA (2025).

Como se observa en la Figura 2.5, la soja domina ampliamente tanto en superficie sembrada como en producción, le siguen en superficie el trigo y la cebada, mientras que el maíz y el arroz presentan superficies menores pero rendimientos por hectárea significativamente más altos. El sorgo, por su parte, representa la fuente de menor escala dentro del conjunto analizado.

### **2.2.3.2. Propiedades y potencial energético**

Los rastrojos presentan variabilidad en sus propiedades según el cultivo, las condiciones climáticas, así como su manejo y almacenamiento. Aún así, cuando se recolectan en condiciones secas presentan humedades relativamente bajas, lo que los vuelve atractivos para combustión frente a otras biomásas.

En términos energéticos, se reportan poderes caloríficos en base seca del orden de 4.000 - 4.800 kcal/kg, dependiendo del cultivo (Gutiérrez et al., 2017), equivalentes a poderes caloríficos en base húmeda en el rango de 3000 - 4300 kcal/kg. Físicamente, el rastrojo es un material liviano y voluminoso, con baja densidad aparente de aproximadamente 70 kg/m<sup>3</sup> en promedio (García-Martínez et al., 2023).

Cabe destacar que estas biomásas presentan alto contenido de materia volátil, pero también cenizas y compuestos inorgánicos. Este aspecto puede generar desafíos operativos en sistemas de combustión, ya que el contenido de alcalinos y cloro tiende a reducir las temperaturas de fusión de cenizas y favorecer fenómenos de depósitos, slagging y fouling (Livingston, 2016).

### **2.2.3.3. Experiencias de valorización**

En Dinamarca, la central de Avedøre (Copenhague) es un ejemplo contemporáneo de valorización energética de rastrojo a escala industrial. La planta opera con pellets de madera y paja mediante calderas dedicadas para cada combustible, la caldera de paja es capaz de consumir hasta 25 ton/h y aportar más de 120 MW de vapor de alta presión (Ramboll, s. f.).

En Uruguay, Pena et al. (2017) analizaron rastrojos de soja, trigo, maíz, sorgo y cebada y cuantificaron su potencial para generación eléctrica. Sus resultados muestran un potencial total superior a 700 MW, con un aporte predominante de soja y trigo, seguidos por maíz, sorgo y cebada. Además, reportan el potencial específico por superficie de cada cultivo, donde el maíz presenta el mayor potencial por hectárea, con 832 W/ha.

### **2.2.4. Aserraderos**

La industria forestal en Uruguay opera de forma integrada, incluyendo todas las etapas de producción silvícola, cosecha, transporte, transformación industrial y comercialización final. En 2024, la Dirección General Forestal estimó una extracción total del orden de 22,7 millones de m<sup>3</sup>, con una asignación por destino productivo altamente concentrada (Figura 2.6), de las cuales 3.463 miles de m<sup>3</sup> correspondieron a trozas para aserrío, tableros y chapas, dando lugar a una producción de 898 miles de m<sup>3</sup> de madera aserrada (Dirección General Forestal, 2025). En ese mismo año, el sector forestal alcanzó un máximo histórico de exportaciones por USD 3.045 millones, con fuerte predominio de celulosa (84%), seguida por madera aserrada y tableros en proporciones significativamente menores (Uruguay XXI, 2025).



Figura 2.6. Gráfico “Extracción de Madera 2024 por destino productivo”.

Fuente: MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, y Dirección General Forestal (2025).

El subsector aserradero presenta una estructura muy diversa en cuanto al tamaño de los establecimientos. Si bien la mayoría corresponde a plantas de pequeña escala, el consumo de madera y la generación potencial de residuos se encuentra fuertemente concentrado a pocas empresas de gran tamaño: cuatro aserraderos generan el 76% del volumen consumido, mientras que el 85% de las empresas participa apenas con el 11% (Boscana & Boragno, 2020). La Encuesta de Aserraderos 2020 relevó 77 establecimientos distribuidos en 14 departamentos del país, con concentración en Rivera (35%), seguida por Paysandú (16%), Canelones (12%) y Tacuarembó (9%), coherente con la localización de las principales plantaciones forestales (Figura 2.7).

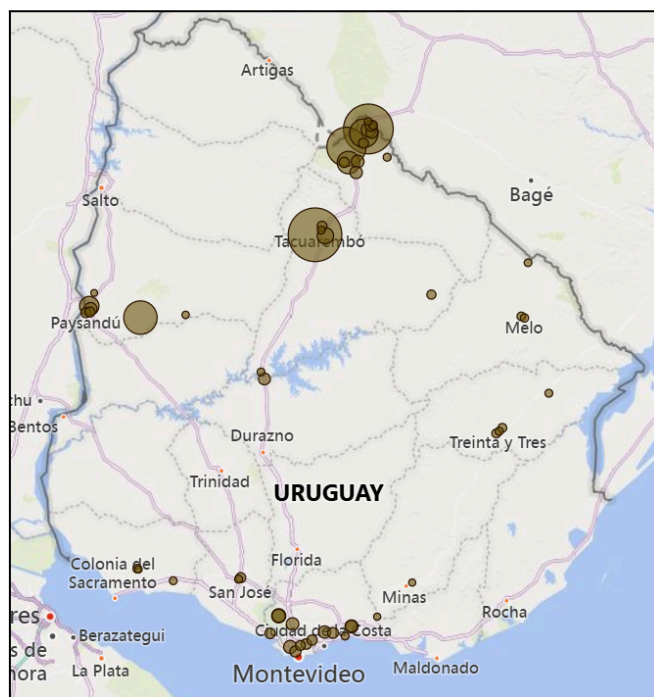


Figura 2.7. Distribución geográfica de aserraderos en Uruguay.

El diámetro de los círculos es proporcional al volumen de producción. Fuente: Elaboración propia a partir de Encuesta de Aserraderos (2020).

#### **2.2.4.1. Generación de residuos**

En un aserradero típico, se generan subproductos y residuos a lo largo de varias operaciones: descortezado, aserrado primario, trozado y dimensionado, astillado y operaciones de acabado. Torres Rippa et al. (2019) caracterizan las fracciones de los residuos de la siguiente manera:

- Corteza: 4,48%
- Costaneros: 28,88%
- Aserrín: 36,79%
- Viruta: 13,33%
- Despunte: 7,05%
- Finos: 0,41%
- Otros: 9,26%

En términos globales, los residuos representan aproximadamente el 50–55% del volumen de madera procesada (Faroppa, 2010; Torres Rippa et al., 2019), siendo el aserrín y los costaneros las fracciones de mayor volumen y, por ende, las de mayor potencial para su valorización energética.

#### **2.2.4.2. Propiedades y potencial energético**

El mix de especies procesadas incide directamente en las propiedades físicas y energéticas de los residuos generados, afectando su densidad y contenido de humedad. En 2019, el consumo de madera relevado en aserraderos estuvo compuesto por 62,5% de pino, 37,1% de eucalipto y 0,4% de salicáceas (Boscana & Boragno, 2020), lo que permite caracterizar el perfil predominante de biomasa residual del sector.

En este contexto, el contenido de humedad adquiere particular relevancia para la valorización energética. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el aserrín verde con 50% de humedad presenta un poder calorífico de 9,5 MJ/kg, mientras que el aserrín seco con 13% de humedad ronda los 16,2 MJ/kg (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, s. f.). Esta diferencia evidencia el impacto directo del secado en el rendimiento energético, aunque dicho proceso incorpora costos adicionales y mayores tiempos de acopio que deben tenerse en cuenta.

#### **2.2.4.3. Experiencias de valorización**

La valorización de los residuos de aserradero es heterogénea y depende de la escala del establecimiento. En plantas de mayor porte, el aprovechamiento interno es sistemático, destinado principalmente al abastecimiento de hornos de secado y generación de vapor y los excedentes suelen orientarse a mercados energéticos o industriales, como la producción de celulosa (Boscana & Boragno, 2020; Böthig et al., 2021). En establecimientos de menor escala, la gestión es dispar: si bien los costaneros suelen comercializarse como leña o chips para calderas, el aserrín frecuentemente se dona, se destina a usos de bajo valor o se descarta, registrándose en algunos casos problemas de acopio por acumulación (Boscana & Boragno, 2020). El proyecto Latitud reporta que el 78,2% de los residuos relevados se destina a generación o cogeneración eléctrica, mientras que el resto se distribuye entre ventas a la industria de celulosa (9,1%), energía térmica (6,3%, mayormente interna) y un 3,8% que permanece sin valorizar (Böthig et al., 2021).

Un ejemplo representativo es la planta de cogeneración de Lumin en Uruguay, que opera con 12 MW utilizando subproductos de tableros contrachapados. El vapor y la electricidad se usan en el propio proceso industrial y los excedentes se inyectan a la red a través de un contrato con UTE, con una entrega neta de 8.424 MWh en 2024 (MIEM, 2022). Este caso ilustra que la biomasa residual alcanza mayor eficiencia económica cuando prioriza la cobertura de demandas térmicas internas y complementa con generación eléctrica cuando existe excedente (MIEM, 2022).

### 2.2.5. Silvicultura

El rubro forestal en Uruguay ha experimentado una expansión sostenida en las últimas décadas, consolidándose como una de las actividades agroindustriales más dinámicas del país, impulsada principalmente por el crecimiento de la demanda de madera para la producción de celulosa. En la Figura 2.8. se presenta la serie histórica de superficie forestada para el período 1975–1981 y 1982–2023, que permite visualizar el crecimiento del sector en el largo plazo.

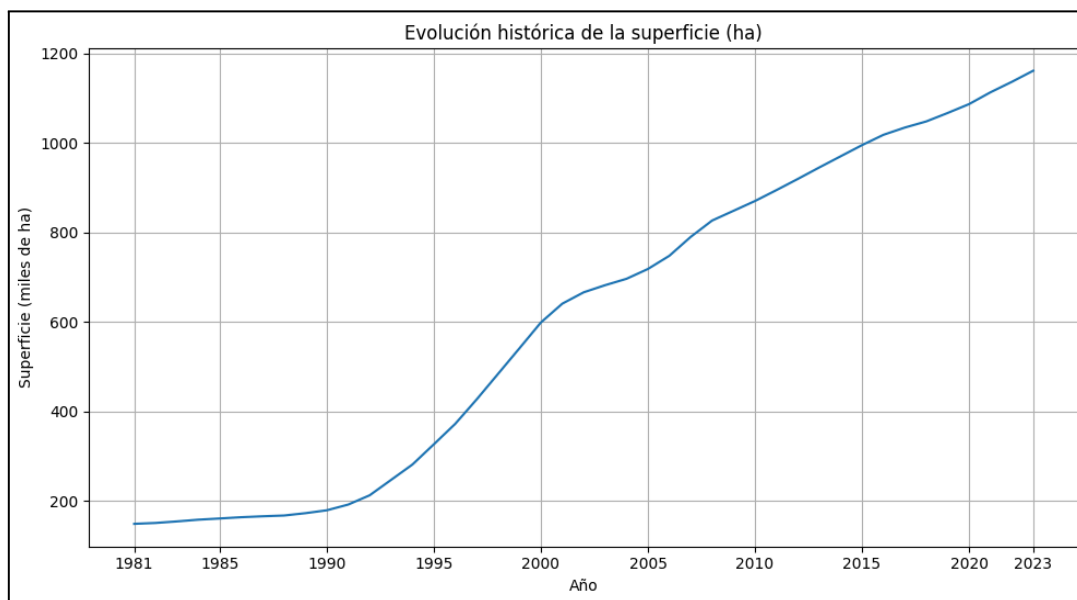


Figura 2.8. Superficie forestada 1981-2023.

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de: MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (2025b).

Según la Cartografía Forestal Nacional 2024, la superficie efectiva de bosque plantado alcanzó 1.161.851 ha, lo que representa un aumento del 6,9% respecto a 2021 (MGAP-DGF, 2025). En 2024, la celulosa lideró las exportaciones del país por primera vez, representando el 20% del total exportado con USD 2.545 millones y superando a la carne bovina como principal rubro de exportación (Uruguay XXI, 2025). Este desempeño se asocia en gran medida al inicio de operaciones de la segunda planta de UPM en Paso de los Toros en abril de 2023. En términos de composición, la mayor parte de la superficie forestada corresponde a *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunnii*, orientadas principalmente a la producción de pulpa y cuya participación ha aumentado en los últimos años. En menor proporción se encuentran *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, destinadas mayoritariamente a la producción de madera sólida (MGAP-DGF, 2025).

La distribución espacial de las plantaciones se concentra en el noreste y centro del país y, particularmente, en áreas vinculadas a la cuenca del río Negro, donde se ha desarrollado parte importante de la base forestal y la infraestructura industrial asociada (MGAP-DGF, 2025). Del total de bosques plantados, los departamentos que más abarcan son Rivera (12,20%), Tacuarembó (12,03%), Río Negro (11,61%) y Paysandú (11,08%), según datos del DIEA que se visualizan en la Figura 2.9.

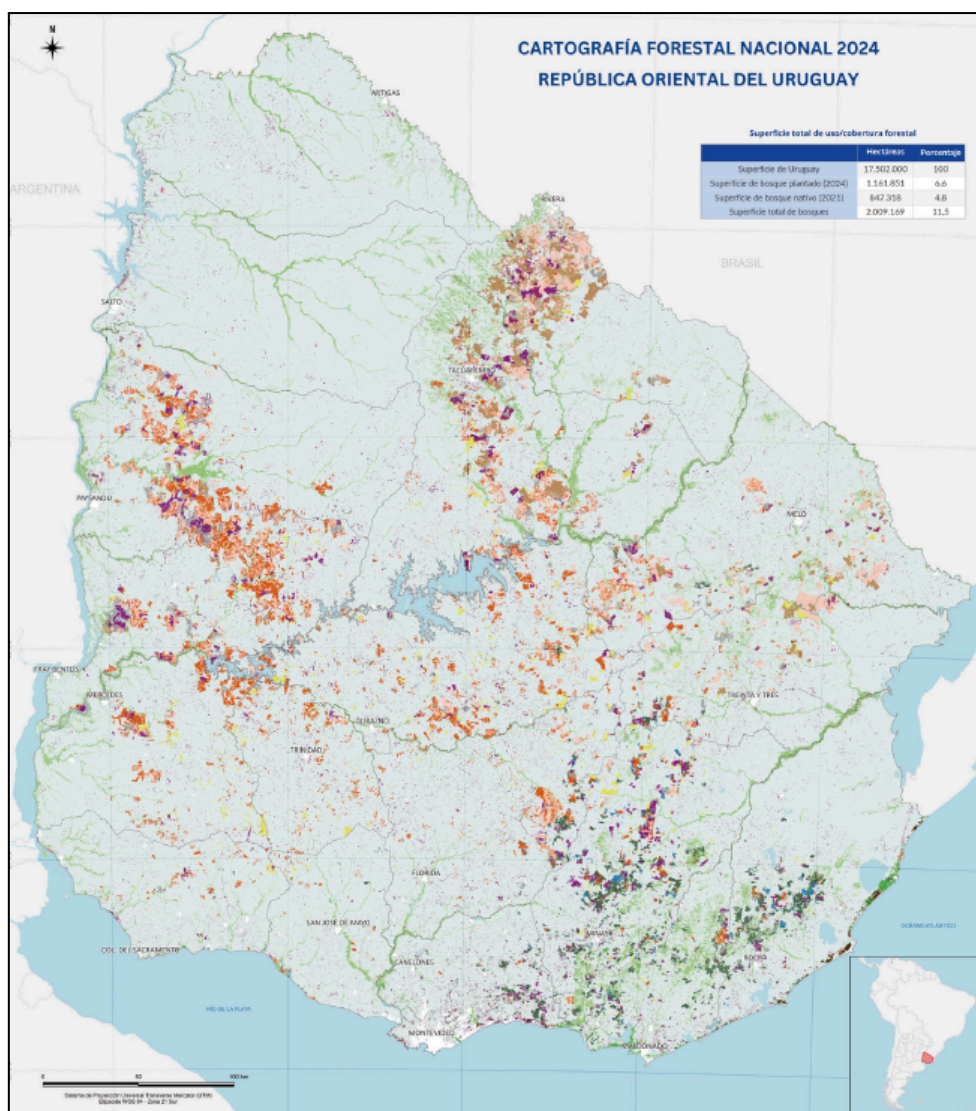


Figura 2.9. Cartografía Forestal Nacional 2024, Uruguay.

Fuente: MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (2025a).

### 2.2.5.1. Generación de residuos

Las plantaciones forestales en Uruguay se manejan con rotaciones relativamente cortas, típicamente entre 7 y 12 años para destinos celulósicos, e incluyen prácticas intermedias como raleos y podas. Estas operaciones generan diferentes fracciones residuales en función de la especie, el sistema de cosecha y el objetivo de la materia prima.

Según el proyecto PROBIO (INIA), los principales residuos de silvicultura comprenden las ramas y copas que permanecen en el suelo tras talas y raleos, despuntes y puntas de árbol no comercializables por diámetro o forma, y descartes de trozas fuera de especificación o con defectos. Asimismo, se generan tocones y raíces superficiales, que generalmente permanecen in situ por criterios operativos y ambientales, siendo su extracción limitada o selectiva, y corteza, cuya generación en monte depende del sistema de cosecha, aunque su mayor volumen se produce a nivel industrial.

No obstante, la disponibilidad técnica no coincide necesariamente con la disponibilidad utilizable. Una fracción relevante del residuo permanece en campo para protección del suelo, retorno de materia orgánica y conservación de nutrientes, además de existir restricciones operativas vinculadas a accesibilidad, pendientes o condiciones del terreno. Se estima que entre el 50% y el 70% de los

residuos generados resulta aprovechable, en línea con antecedentes internacionales y evaluaciones técnicas sobre recuperación de residuos forestales (Gutiérrez et. al, 2017).

### 2.2.5.2. Propiedades y potencial energético

Desde el punto de vista energético y logístico, Nurek et al. (2019) estiman un poder calorífico de 3.771,4 kcal/kg en base húmeda y densidades aparentes del material triturado entre 110 y 190 kg/m<sup>3</sup>. Asimismo, Kizha et al. (2018) reportan contenidos de humedad de hasta 52% en residuos recién cosechados, reduciéndose a aproximadamente 12% tras seis meses de secado natural.

### 2.2.6. Resumen de características de residuos

La Tabla 2.1 resume las principales características de los residuos de biomasa evaluados en este trabajo. Para cada materia prima se presenta la densidad aparente, el poder calorífico en base húmeda, y la cantidad aprovechable estimada. Los valores provienen de diversas fuentes bibliográficas detalladas en el [Anexo I](#) y señaladas en cada celda con el número de fuente correspondiente. En los casos en que fue necesario realizar estimaciones o cálculos intermedios a partir de datos primarios, el procedimiento detallado se describe en el mismo anexo.

*Tabla 2.1. Resumen de características de residuos.*

Materia Prima	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Poder calorífico (kcal/kg, b.h)	Cantidad aprovechable aproximada (ton/año)
Contenido ruminal	770 (1)	2.153 (1)	81.221
Cáscara de arroz	120 - 130 (2)	3.300 (8)	272.160
Rastrojos de cultivos (arroz, trigo, maíz, soja y cebada)	70 (3)	3.000 - 4.300 (6)	2.829.523
Residuos de aserradero	100 - 450 (4)	2.300 - 3.800 (8)	270.318
Silvicultura	110 - 190 (5)	3.770 (8)	1.640.343

### 2.3. Métodos de densificación

La biomasa cruda, presenta características físico-químicas que dificultan su manejo, transporte y uso energético directo. En este contexto, los pretratamientos (físicos, químicos o térmicos) buscan acondicionar el material para mejorar su desempeño como combustible. Dentro de ellos, la densificación consiste en compactar mecánicamente la biomasa mediante la aplicación de presión, reduciendo su volumen y aumentando la densidad energética por unidad de volumen (Vaish et al., 2022).

Además de mejorar la eficiencia logística, la densificación aporta beneficios operativos, al obtener un combustible más uniforme, la combustión tiende a ser más estable y el control del caudal de alimentación a calderas o reactores se vuelve más preciso (Kaur et al., 2017). La calidad final del producto densificado no depende únicamente de la presión aplicada, sino también de fenómenos fisicoquímicos a escala de partícula. Durante la compactación, la fricción interna genera aumentos locales de temperatura que favorecen la activación de ligantes naturales, en biomásas lignocelulósicas, la lignina cumple un rol central como aglutinante, contribuyendo a la cohesión y estabilidad mecánica (Börsök & Pásztor, 2021). En la mayoría de los casos, este mecanismo permite prescindir de aditivos. Sin embargo, cuando la materia prima presenta baja capacidad de autoligado, puede ser necesaria la incorporación de aglutinantes orgánicos (almidones, melaza o subproductos lignínicos) o inorgánicos (arcillas), aunque estos últimos pueden incrementar el contenido de cenizas.

Desde el punto de vista económico, la densificación resulta determinante para la viabilidad de la valorización energética. Como se describió en la sección anterior, muchos residuos agroindustriales presentan densidades aparentes bajas, lo que genera ineficiencias en el transporte debido a restricciones volumétricas que impiden alcanzar el límite de carga, elevando el costo por tonelada transportada. Al densificar, se optimiza el uso de la flota y se reduce el espacio requerido para acopio y almacenamiento en planta (Kaur et al., 2017). Complementariamente, al reducir la humedad del combustible, aumenta el poder calorífico neto y disminuye la energía perdida en evaporación durante la operación, mejorando la estabilidad térmica del sistema (Natural Resources Canada, 2016).

Existen diversos métodos de densificación, entre los cuales destacan el peletizado, el briquetado, el triturado, el enfardado y la torrefacción. Cada tecnología presenta ventajas y limitaciones según el tipo de materia prima, la escala de operación y el uso final del producto.

### **2.3.1. Peletizado**

Los pellets son biocombustibles sólidos de forma cilíndrica y dimensiones estandarizadas, obtenidos por extrusión de biomasa previamente acondicionada a través de una matriz perforada (World Bioenergy Association, 2014). Generalmente presentan diámetros del orden de 6 a 12 mm, lo que facilita su almacenamiento, manipulación y la operación de calderas con alimentación automática y controlada.

Su producción requiere una secuencia de operaciones controladas. En primer lugar, la biomasa se somete a una reducción de tamaño, normalmente mediante trituración, hasta granulometrías inferiores a 3 mm, lo que reduce el riesgo de obstrucción en la matriz y favorece la compactación (Yu et al., 2003). Si el contenido de humedad del material supera los valores operativos admisibles, se incorpora una etapa de secado térmico hasta alcanzar humedades del orden del 8–10% (Kaur et al., 2017). La etapa central consiste en la compactación en prensas de matriz plana o anular donde rodillos comprimen el material contra la matriz perforada, dándole su forma cilíndrica característica. En algunos esquemas se incorpora una etapa de acondicionamiento con vapor para plastificar la lignina, reduciendo el desgaste de las matrices. Finalmente, el producto se enfría mediante aire en contracorriente para consolidar su resistencia mecánica (Kaur et al., 2017; World Bioenergy Association, 2014).

El pellet es la tecnología de mayor estandarización dentro de los métodos de densificación, respaldada por normas internacionales como la ISO 17225-2, que clasifica el producto en categorías A1, A2 y B según contenido de cenizas, durabilidad mecánica y poder calorífico (World Bioenergy Association, 2014). El rendimiento del pellet varía considerablemente según la materia prima utilizada. En comparación con los pellets de madera, los elaborados a partir de residuos agrícolas, como cáscara de arroz o rastrojo, presentan un mayor contenido de cenizas y menor durabilidad mecánica, lo que puede limitar su compatibilidad con ciertos equipos y afectar su desempeño en almacenamiento y transporte (NSW Department of Primary Industries, 2019).

### **2.3.2. Briquetado**

Las briquetas son productos densificados de mayor tamaño que los pellets, con geometrías típicamente cilíndricas de aproximadamente 50 a 150 mm de diámetro o prismáticas tipo ladrillo (Marcos Martín, s. f.). Se producen principalmente mediante prensas de pistón (mecánicas o hidráulicas), extrusoras de tornillo sinfín o prensas de rodillos. Las extrusoras de tornillo sinfín operan de forma continua con aporte térmico, lo que puede sellar la superficie del producto, mejorando su resistencia a la humedad y produciendo briquetas con orificio central, lo que favorece la combustión (Marcos Martín, s. f.; Kaur et al., 2017). Los requisitos de granulometría son menos estrictos que en el peletizado, admitiéndose partículas de hasta 6–8 mm.

Desde el punto de vista operativo, el briquetado resulta adecuado para biomásas de difícil peletización y suele implicar menor complejidad tecnológica y menores costos de inversión que el peletizado. Su

uso final se orienta principalmente a aplicaciones térmicas con alimentación manual o semiautomática, donde no se requiere el alto grado de estandarización dimensional propio de los pellets. Como limitación, el producto es menos uniforme, debido a la distribución no homogénea de presión durante el prensado y a la mayor variabilidad geométrica admitida. Su comportamiento frente a la humedad depende fuertemente de la tecnología utilizada y de las condiciones de la materia prima (Kaur et al., 2017).

### **2.3.3. Triturado**

El triturado es una operación mecánica destinada a homogeneizar la morfología del material y ajustar su granulometría, lo que incide tanto en el comportamiento del combustible como en el desempeño de los procesos termoquímicos posteriores (Paraschiv et al., 2021). El consumo energético del proceso, depende principalmente del tamaño de criba seleccionado y del contenido de humedad del material, biomásas con alta humedad presentan mayor tenacidad, lo que incrementa el consumo y puede provocar el empastamiento de los tamices (Su & Yu, 2019). La distribución de tamaños resultante suele caracterizarse mediante modelos como Rosin-Rammler, que permiten cuantificar la uniformidad granulométrica del producto.

Respecto a otras tecnologías, el triturado presenta menor complejidad tecnológica y resulta especialmente adecuado para biomásas voluminosas e irregulares, como residuos forestales y de aserradero. En aplicaciones de combustión, una granulometría controlada favorece la estabilidad del frente de llama y reduce problemas operativos asociados a mezclas heterogéneas (Paraschiv et al., 2021). Su principal limitación es que no alcanza los niveles de densificación del peletizado o el briquetado, por lo que su impacto sobre los costos de transporte es más moderado.

### **2.3.4 Enfardado**

El enfardado consiste en compactar biomasa suelta mediante presión mecánica para formar fardos cilíndricos o prismáticos. El proceso se realiza luego del corte y acondicionamiento del material: la biomasa es recolectada, comprimida en una cámara de compactación y atada para conservar su forma. Se trata de una forma de densificación más simple que el peletizado o el briquetado, pero ampliamente utilizada en residuos agrícolas y biomasa herbácea por su simplicidad operativa y su integración directa con las tareas de cosecha y recolección en campo, lo que reduce operaciones intermedias y mejora la eficiencia del proceso (Martelli et al., 2015; Albashabsheh et al., 2019).

El enfardado es una tecnología madura, ampliamente difundida en cadenas agrícolas, con equipos disponibles comercialmente y costos de inversión relativamente bajos. Sin embargo, el producto obtenido mantiene una densidad volumétrica baja frente a pellets o briquetas, y su estabilidad depende en gran medida del contenido de humedad al momento del enfardado, valores superiores al 18% pueden deteriorar la calidad del producto (Khanchi et al., 2013).

### **2.3.5 Torrefacción combinada**

La torrefacción es un proceso termoquímico que se lleva a cabo en atmósfera inerte o con déficit de oxígeno, a temperaturas de entre 200 y 300 °C durante períodos de 20 a 60 minutos, con el objetivo de mejorar las propiedades de la biomasa para su uso energético (Tumuluru et al., 2021). Durante este tratamiento, el material pierde humedad y parte de sus compuestos volátiles, dando lugar a un sólido más homogéneo, con mayor contenido energético y mejores condiciones de almacenamiento que la biomasa original. En términos generales, se retiene aproximadamente 70% de la masa inicial y cerca de 90% de la energía en el sólido obtenido (Tumuluru et al., 2011). Cuando se combina con peletizado o briquetado, se obtiene un biocombustible sólido con propiedades superiores a las de los productos densificados convencionales. En Uruguay, esta combinación ha sido explorada a nivel de investigación aplicada con biomasa de eucalipto y pino (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, 2016).

La torrefacción aporta beneficios relevantes, reduce la afinidad del material por el agua, haciendo el producto más hidrofóbico y estable en almacenamiento, incrementa la densidad energética del sólido acercándolo al comportamiento del carbón, y facilita la reducción de tamaño, pudiendo reducir a la mitad la energía de molienda respecto a pellets convencionales (Alizadeh et al., 2022; Tumuluru et al., 2011). Sin embargo, es la alternativa de mayor complejidad operativa. La degradación parcial de la lignina durante la torrefacción puede reducir la capacidad aglomerante natural del material, lo que en casos de torrefacción severa puede requerir mayores presiones de compactación, control estricto de humedad o el uso de aditivos para lograr productos con resistencia mecánica adecuada (Aamiri et al., 2019).

## **2.4. Densificación móvil**

La densificación móvil representa un enfoque alternativo respecto a los modelos de procesamiento fijos. En los esquemas convencionales, la biomasa en estado crudo debe transportarse hasta una planta centralizada, lo que suele implicar una utilización ineficiente de la capacidad volumétrica de los vehículos dado su baja densidad aparente. En contraste, las unidades de densificación móvil se trasladan hacia o cerca de los puntos de generación o centros de acopio, permitiendo transformar el material in situ o en etapas tempranas de la cadena logística. Técnicamente, el concepto se define como el empleo de equipos de procesamiento transportables integrados en plataformas móviles o contenedores estandarizados que pueden reubicarse periódicamente según la disponibilidad estacional del recurso.

### **2.4.1. Ventajas y limitaciones**

La incorporación de tecnologías de densificación móvil en la cadena de suministro introduce mejoras en la eficiencia operativa y estratégica del sector, al modificar la localización y la dinámica del procesamiento primario. En lugar de concentrar la transformación en instalaciones fijas, este modelo permite trasladar la capacidad de procesamiento hacia las zonas de generación, adaptando la operación a la distribución espacial y temporal del recurso (Albashabsheh, 2018).

Esta flexibilidad permite que una unidad procesadora opere en una región durante el pico de producción y, una vez agotado el residuo local, se traslade a otros nodos, manteniendo niveles elevados de utilización del equipamiento y reduciendo la dependencia de un único punto de abastecimiento. Frente a la incertidumbre climática y la variabilidad en los rendimientos de los cultivos, la posibilidad de reubicar la infraestructura protege la inversión de capital y facilita una planificación más flexible del sistema (Psathas et al., 2022).

Asimismo, el procesamiento in situ o en proximidad al origen del residuo incrementa la eficiencia logística al reducir el transporte de biomasa en estado crudo. Se estima que el uso de biomasa previamente densificada puede reducir hasta en un 60% los costos directos de transporte (Possidônio et al., 2016). En este sentido, la densificación móvil no solo mejora la organización territorial del procesamiento, sino que también contribuye a una operación logística más eficiente y sostenible.

A pesar de las ventajas operativas, la densificación móvil enfrenta barreras significativas que han limitado su adopción a gran escala, principalmente relacionadas con la estructura de costos y el grado de tecnología de los sistemas disponibles (Albashabsheh, 2018). Debido a sus restricciones de tamaño y peso para el transporte por carretera, las unidades móviles no pueden alcanzar las capacidades de procesamiento masivo de las plantas fijas, lo que resulta en costos de capital y operación por tonelada procesada generalmente superiores. Se ha reportado que la producción de pellets en sistemas móviles puede costar hasta un 120% más que en sistemas fijos de gran escala, por lo que su rentabilidad depende de que los ahorros logísticos compensen este sobrecosto (Albashabsheh, 2018).

Desde el punto de vista operativo, el uso de maquinaria de alta precisión en entornos descentralizados y frecuentemente a la intemperie incrementa el desgaste mecánico y complejiza las tareas de mantenimiento preventivo. Además, cada reubicación de la unidad conlleva un costo logístico y un

tiempo de inactividad que debe optimizarse (Albashabsheh, 2018). Por otra parte, los procesos de densificación de mayor calidad, especialmente el peletizado, requieren especificaciones estrictas de humedad y granulometría, lo que obliga a las unidades móviles a incorporar sistemas de secado y molienda, aumentando el consumo energético total del sistema (Albashabsheh, 2018).

## **2.4.2. Antecedentes de investigación**

La literatura ofrece distintas perspectivas sobre la viabilidad de la densificación móvil, con resultados que varían según el contexto geográfico y las condiciones del sistema analizado.

Jacobson et al. (2021) realizó un análisis comparativo entre plantas de pellets estacionarias y móviles en British Columbia, Canadá, vinculando la producción bioenergética con la mitigación de incendios forestales. Si bien las unidades móviles presentaron un costo de producción unitario dos veces mayor, su capacidad de acceder a biomasa marginal en zonas de difícil acceso, que de otro modo requeriría gastos gubernamentales en control de incendios, las convirtió en una alternativa económicamente conveniente al considerar el sistema en su conjunto.

En la misma línea, Psathas et al. (2022) desarrolló una metodología para optimizar cadenas de suministro descentralizadas utilizando pirólisis rápida móvil en Escocia, incorporando explícitamente la estacionalidad de la biomasa. Sus resultados mostraron que la capacidad de almacenamiento en los nodos descentralizados es el factor de mayor influencia sobre el beneficio neto, y que los costos de reubicación de las plantas móviles representaron menos del 5% de los costos totales de transporte, validando la viabilidad de reubicar frecuentemente las unidades.

Albashabsheh (2018) propuso un modelo para diseñar una red de suministro de biomasa lignocelulósica integrando máquinas de peletización móviles con desplazamiento mensual entre puntos de generación o acopio. El estudio analizó cómo las variaciones en los costos operativos y las distancias geográficas influyen en la decisión de densificar. Los resultados mostraron que, bajo las condiciones evaluadas, la peletización móvil era marginalmente menos atractiva, pero que reducciones modestas en los costos fijos la convertían en la solución óptima, evidenciando la sensibilidad de la decisión a parámetros operativos clave.

## **2.4.3. Equipos disponibles en el mercado**

El mercado ofrece soluciones de densificación móvil para las principales tecnologías analizadas. A continuación se presentan ejemplos representativos de unidades de peletización, briquetado y triturado disponibles comercialmente.

### **2.4.3.1. Unidades de peletizado móvil**

Un ejemplo representativo de máquinas de peletizado móvil es el sistema de Proxipel SA (Suiza), con una capacidad aproximada de 1 ton/h. Una característica destacable es su capacidad de procesar biomasa con hasta 60% de humedad, reduciéndola a aproximadamente 13% mediante un sistema de secado integrado con quemador de biomasa e intercambiador de calor. La unidad opera con un solo operario y admite materiales de hasta 30 cm de diámetro, lo que la hace apta para residuos de aserradero y forestales (European Commission, 2020).

En una escala mayor, el PelletBox, desarrollado por Prodesa (España), es una planta de granulación modular alojada íntegramente en cuatro contenedores marítimos de 40 pies, con capacidad de hasta 5 ton/h. Esta solución es compatible con todo tipo de biomasa y minimiza los costos de ingeniería y construcción in situ (Bioenergy International, 2019).

Un tercer ejemplo es la planta de peletización serie MPL de GEMCO, diseñada para operaciones de pequeña y mediana escala sobre un chasis móvil. El modelo MPL 400, con una capacidad de producción de entre 350 y 450 kg/h, integra en una unidad compacta las etapas de molienda, separación, mezcla con ajuste de humedad, granulación mediante una prensa de matriz plana y un sistema de enfriamiento para asegurar la calidad del pellet final. (GEMCO Energy, 2023).

#### **2.4.3.2. Unidades de briquetado móvil**

El sistema de briquetado desarrollado por C.F. Nielsen (Dinamarca) integra sus unidades móviles en contenedores de 20 pies, con silos de dosificación de 6 m<sup>3</sup>, prensas mecánicas, líneas de enfriamiento y sistemas de control PLC con monitoreo en tiempo real. Un caso de aplicación relevante es el de la multinacional Del Monte, que utiliza estas briquetadoras para procesar residuos de plantaciones de piña en África, valorizando un residuo que anteriormente carecía de destino comercial y reduciendo simultáneamente sus costos logísticos internos (C.F. Nielsen, s. f.).

Como alternativa orientada a biomasa no leñosas, la densificadora Biomasser Mobile es una línea transportable montada sobre su propio chasis, diseñada para materiales con 10–30% de humedad y con una capacidad de producción de entre 480 y 1.120 kg/h (Asket, s. f.).

#### **2.4.3.3. Unidades de triturado móvil**

Un primer ejemplo de trituradora móvil corresponde a máquinas de alta capacidad desarrolladas por Bruks-Siwertell (series 806 y 1006), montadas sobre camiones o tractores forestales. Estos equipos están diseñados para operar dentro del monte, procesando fustes y restos de tala directamente en los cordones de residuos. Esta configuración permite cargar los vehículos con astillas uniformes en lugar de biomasa bruta, mejorando significativamente la eficiencia logística (Tolosana et al., 2008).

Por otro lado, la densificadora Crambo Mobile 4200 de Komptech es una trituradora móvil de doble eje y baja velocidad orientada al procesamiento de madera y residuos verdes. El equipo utiliza dos tambores contrarrotantes, permite ajustar la granulometría del producto final y alcanza capacidades de hasta 45 ton/h (Komptech, 2024).

### **2.5. Transporte y logística**

En línea con el objetivo del presente trabajo resulta necesario examinar en detalle el componente de transporte dentro del sistema logístico. La baja densidad aparente, el alto contenido de humedad, el bajo poder calorífico, la dispersión geográfica y la estacionalidad de la biomasa residual incrementan los costos específicos de recolección, manejo, almacenamiento y, especialmente, transporte cuando las distancias entre los puntos de generación y las plantas de procesamiento aumentan (Nunes et al., 2021).

A diferencia de las fuentes de energía convencionales, cuya logística suele estar consolidada y optimizada tras décadas de desarrollo industrial, la biomasa presenta otros desafíos propios de su naturaleza biológica y su dispersión geográfica. En este sentido, la logística no debe entenderse únicamente como el movimiento de materiales, sino como un sistema integrado que abarca desde la recolección en el punto de origen hasta la entrega en la planta de procesamiento final, pasando por etapas de pretratamiento y almacenamiento temporal, con el objetivo de minimizar el costo por unidad energética entregada.

Desde una perspectiva de cadena de suministro, una forma práctica de ordenar el problema logístico es considerar tres componentes principales: evaluación de medios de transporte, análisis de localización de puntos de acopio y plantas de transformación (nodos), y definición de rutas de abastecimiento (Tauro et al., 2022).

Generalmente, los sitios de generación no presentan la escala suficiente para ser el punto final de conversión energética, pero sí pueden funcionar como nodos de preprocesamiento antes de enviar el material a una planta de mayor escala. Esto abre la posibilidad de redes logísticas multietapa, donde la estrategia consiste en mejorar el transporte de larga distancia mediante la transformación previa del material. En este sentido y en línea con lo discutido en la sección anterior, la densificación, se consolida como una herramienta que hace los productos más transportables.

Por otro lado, Tauro et al. (2022) destacan que la sostenibilidad económica del sistema requiere modelar explícitamente los mecanismos de recolección y transporte, integrando análisis espaciales con modelos matemáticos que optimicen los costos entre centros de acopio y plantas finales. Los autores señalan que los costos de transporte dependen de la cantidad transportada, las distancias, la

topografía, el consumo específico de combustible y el tipo de vehículo. Es decir, el transporte de biomasa no se explica únicamente por la distancia, sino por la interacción entre geografía, operación y escala.

Asimismo, muestran que la solución óptima no se define necesariamente por la ruta más corta, sino por la relación entre distancia y volumen transportado, dado que el costo total está influido tanto por los kilómetros recorridos como por la cantidad de viajes y la magnitud del flujo. Al comparar escenarios donde se abastece el 50% versus el 100% de la demanda, evidencian que ampliar la cobertura puede incrementar sustancialmente el costo total y requerir modificaciones en la estructura de la red, como la incorporación de nuevos centros de acopio (Tauro et al., 2022).

En este contexto, las propiedades físicas del recurso actúan como restricciones estructurales del modelo logístico. La baja densidad volumétrica implica que los vehículos alcancen su límite espacial antes que su límite de peso, aumentando la frecuencia de viajes requerida por unidad energética transportada (Piñeyro, 2023; Nunes et al., 2021). De forma complementaria, el contenido de humedad reduce el poder calorífico neto y penaliza el transporte al movilizar masa sin aporte energético efectivo (Tauro et al., 2022). En consecuencia, densidad y humedad no solo condicionan la eficiencia operativa, sino que influyen directamente en la configuración óptima de la red.

### **2.5.1. El transporte de biomasa en el contexto de Uruguay**

En Uruguay, los camiones convencionales son los vehículos de carga más comunes en el transporte carretero. En promedio, presentan dimensiones de 2,4 m de ancho, 2,7 m de alto y 13,2 m de largo, con una capacidad de carga que ronda las 45 toneladas de peso bruto total. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, son los que registran el mayor consumo de combustible por kilómetro recorrido.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) ha liderado la implementación de normativas que permiten el uso de tecnologías de transporte de carga pesada más eficientes, conocidas como Vehículos de Alto Desempeño (VAD) (MTOP, 2020), definidos como combinaciones de vehículos de transporte de cargas que superan los límites de peso y/o longitud permitidos para vehículos convencionales. En este marco, el Decreto N° 177/021 autoriza la circulación de vehículos tipo tractor con semirremolque con un peso bruto total (PBT) de hasta 48 toneladas en rutas nacionales específicas, siempre que cumplan requisitos técnicos orientados a garantizar seguridad vial y preservación de infraestructura.

La capacidad efectiva de transporte depende además de la clasificación de las rutas nacionales. El MTOP distingue corredores habilitados para 48 toneladas, que incluyen arterias estratégicas como las Rutas 1, 2, 3, 5 y 8 (hasta Villa Sara), como se aprecia en la Figura 2.10, y corredores con límite de 46 toneladas, como tramos de las Rutas 14 y 20. La selección de la ubicación de una planta de valorización debe considerar su cercanía a estos corredores. Una planta ubicada fuera de estas rutas se verá obligada a utilizar camiones convencionales de menor capacidad, incrementando los costos de transporte de forma proporcional.



Figura 2.10. Distribución geográfica de rutas habilitadas para 48 tons.

Fuente: MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2024).

Más allá de las 48 toneladas, el Decreto N° 303/020 regula la circulación de bitrenes y tritrenes, cuyos distintos diseños y capacidades implican efectos diferenciados sobre el pavimento vial en función de las cargas que transportan.

El decreto define a los bitrenes como “la combinación de un tractor de tres ejes y dos unidades remolcadas del tipo semirremolque de ejes tándem, conectadas entre sí por conexiones tipo B”. Estos vehículos pueden transportar hasta 57 toneladas, un 26% más que un camión convencional, con un menor consumo de combustible por tonelada transportada y, en consecuencia, menores emisiones de CO<sub>2</sub>. Los tritrenes, por su parte, se distinguen por incorporar una tercera unidad remolcada bajo el mismo esquema de conexiones tipo B, lo que eleva su capacidad de carga a 74 toneladas un 29% más que el bitrén y un 64% más que el camión convencional. Sus dimensiones típicas contemplan 2,6 m de ancho, hasta 4,3 m de alto y un largo máximo de 30 m. Al igual que los bitrenes, presentan un consumo de combustible por tonelada transportada inferior al de los camiones convencionales, siendo además más eficiente que el del propio bitrén. En la Figura 2.11.se visualizan los corredores autorizados para la circulación de este tipo de vehículos, según datos oficiales del MTOP.

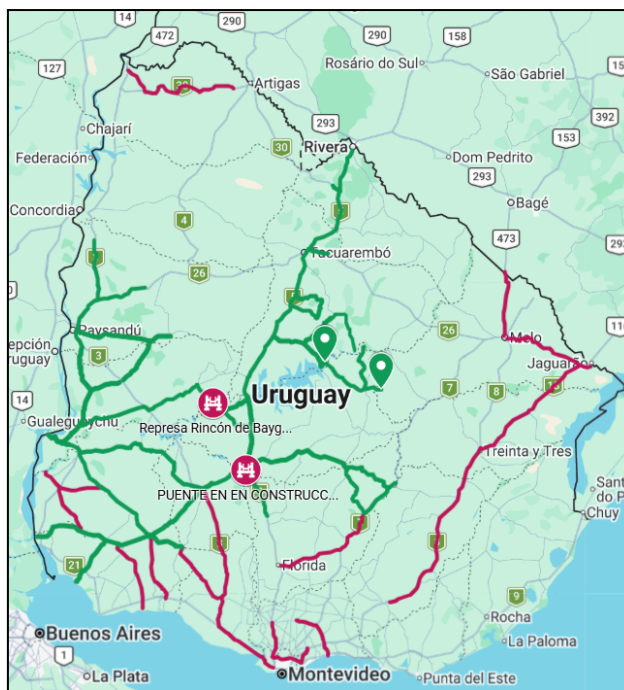


Figura 2.11. Corredores viales autorizados (verde) y posibles a autorizar (rojo) para bitrenes y tritrenes.

Fuente: MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2023)

## 2.5.2. Transporte ferroviario

El transporte ferroviario es una alternativa relevante para la movilización de grandes volúmenes de biomasa a distancias medias y largas, particularmente cuando se trata de flujos regulares hacia nodos logísticos consolidados, como puertos o plantas industriales. En Uruguay, se utiliza mayoritariamente para el transporte vinculado a la industria forestal.

A diferencia del transporte carretero, el ferrocarril resulta viable cuando se cuenta con grandes volúmenes relativamente constantes y la posibilidad de consolidación en nodos intermedios, siempre que se disponga de infraestructura ferroviaria cercana.

En términos operativos, la capacidad de un tren de carga varía según el tipo de material transportado, el material rodante disponible, las condiciones de vía y la configuración de vagones. Un vagón promedio tiene un volumen de 1.850 m<sup>3</sup> y para el sector forestal en Uruguay, se reporta que un tren cargado puede transportar aproximadamente entre 810 y 935 toneladas (Caraballo et al., 2021). Esto permite concentrar grandes volúmenes en un número reducido de movimientos, reduciendo la frecuencia de viajes requerida en comparación con el transporte carretero, aunque implica menor flexibilidad y mayor coordinación logística.

La Figura 2.12 presenta el mapa de la red ferroviaria de Uruguay y las distintas líneas.

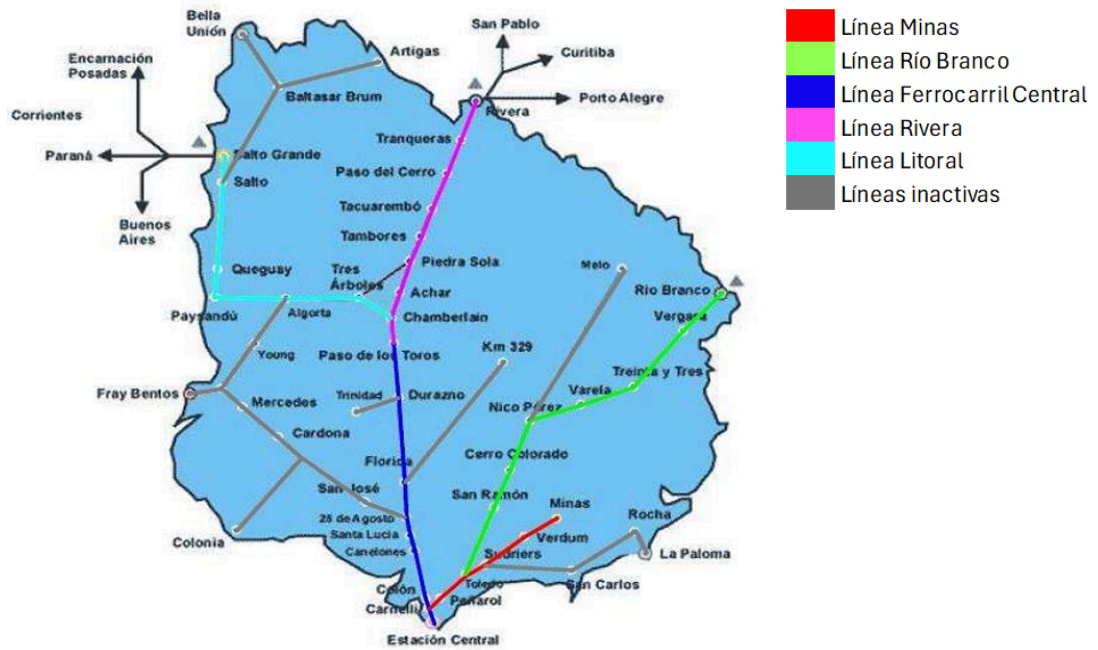


Figura 2.12. Mapa de la Red Ferroviaria de Uruguay.

Fuente: MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas (2025)

### 2.5.3. Transporte fluvial en barcazas

El transporte fluvial en barcazas es una alternativa útil para mover grandes volúmenes a distancias medias y largas, siempre que existan cursos navegables y puntos de carga/descarga definidos.

En Uruguay, el ejemplo más claro de aplicación es Montes del Plata, que emplea barcazas para transportar madera desde Río Negro a Colonia. Cada barcaza puede cargar del orden de 5.000 toneladas, equivalentes aproximadamente a 170 camiones por viaje, y su uso permite reducir a menos de la mitad las emisiones anuales de dióxido de carbono en comparación con un esquema equivalente basado exclusivamente en camiones (Montes del Plata, 2012).

A nivel regional, el transporte en barcazas es muy relevante en la Hidrovía Paraguay–Paraná, que conecta con el océano a través del puerto de Nueva Palmira. Según reportes oficiales, en 2022 se movilizaron por esa vía más de 25 millones de toneladas de carga. (Presidencia de la República Oriental del Uruguay, 2023).

Para cadenas logísticas, el transporte en barcazas resulta competitivo cuando los volúmenes son altos y relativamente estables, la carga puede consolidarse en pocos puntos de embarque, y cuando existe acceso a vías navegables y terminales adecuadas.

### 2.5.4. Camiones eléctricos y camiones a hidrógeno verde

Los camiones eléctricos a batería (BEV) y los camiones eléctricos con pila de combustible a hidrógeno (FCEV) surgen como alternativas modernas para descarbonizar el transporte carretero.

Los camiones eléctricos resultan más adecuados en recorridos cortos y medios, especialmente cuando la recarga puede planificarse y existe infraestructura disponible. Para camiones pesados de nueva generación, se reportan autonomías del orden de 450 a 560 km (Transport & Environment, 2022). Desde el punto de vista económico, su adopción depende principalmente del costo total de propiedad, que incluye el costo de compra, el precio de la energía, el mantenimiento y el nivel de uso del vehículo. Danielis et al. (2025) señalan que la competitividad de los camiones eléctricos ha mejorado en segmentos livianos y medianos, mientras que en camiones pesados aún existen brechas asociadas a

las exigencias operativas y la infraestructura de carga disponible. En logística de biomasa, estos vehículos pueden ser relevantes en tramos de distribución final o en circuitos repetitivos entre centros de acopio y plantas de densificación.

Por otro lado, los camiones a hidrógeno apuntan a casos donde se priorizan mayores autonomías y repostaje rápido. A modo de referencia, se reportan autonomías superiores a 400 km por carga en condiciones reales, con tiempos comparables a los del diésel (Hyundai Motor Company, s. f.). En Uruguay, el proyecto Kahirós propone producir hidrógeno a partir de energía solar para abastecer una flota de camiones destinados al transporte de madera para Montes del Plata (World Bank, 2025). Este caso resulta relevante por integrar la alternativa tecnológica a una operación logística real, considerando rutas, demanda y abastecimiento energético.

En síntesis, ambas opciones pueden complementar el transporte carretero tradicional, pero su conveniencia depende de varios factores. Los BEV resultan atractivos en rutas predecibles con ventanas de recarga planificables, mientras que los FCEV pueden ser una alternativa cuando se requiere repostaje rápido y alta disponibilidad operativa. En ambos casos, la viabilidad depende de distancias, carga transportada, perfil de ruta, disponibilidad de infraestructura y costos energéticos y de inversión (Danielis et al., 2025).

## **2.6. Valorización de residuos**

La valorización energética constituye el objetivo final de la cadena de suministro analizada en el presente trabajo. Si bien el diseño de la planta de valorización excede el alcance del presente proyecto, la comprensión de estos procesos es necesaria para definir correctamente los parámetros de eficiencia y costos utilizados en el modelo desarrollado. En particular, la eficiencia energética del sistema y su modalidad de operación, ya sea generación eléctrica pura o cogeneración, influyen directamente en la viabilidad económica de la cadena de suministro analizada.

Los procesos disponibles para transformar biomasa residual en energía útil pueden clasificarse en mecánicos, termoquímicos y biológicos. Dentro de los procesos termoquímicos, los más utilizados en la industria son la combustión, la gasificación y la pirólisis. En este proyecto se considera exclusivamente la valorización mediante combustión, por ser la tecnología de mayor madurez comercial y la adoptada en los casos de referencia analizados.

La combustión transforma la energía química contenida en la biomasa en calor y, cuando se integra un ciclo de potencia, en electricidad. Una planta típica de generación incluye sistemas de recepción y almacenamiento de biomasa, equipos de preparación y alimentación, caldera para generación de vapor, turbina de vapor acoplada a un generador eléctrico, sistema de condensación y circuito agua-vapor, sistemas auxiliares de control y seguridad, y sistemas de tratamiento de gases y gestión de cenizas (U.S. Department of Energy, 2016.; U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2007). En términos operativos, el residuo se recibe y almacena bajo condiciones controladas para asegurar una alimentación estable. Luego, el material se conduce hacia la caldera, mediante cintas transportadoras o tornillos sinfin, donde ocurre la combustión y el calor liberado se utiliza para generar vapor, el cual se expande en una turbina bajo un ciclo Rankine para producir electricidad (Díaz, 2018).

La eficiencia eléctrica de este tipo de plantas se reporta en el rango del 18%–28% según Curto et al., 2017, aunque otras fuentes sugieren valores de hasta 30%-40% (IEA Bioenergy, s. f.). Cuando el sistema opera en cogeneración, además de producir electricidad se recupera calor útil para procesos térmicos o calefacción, lo que permite aumentar la eficiencia global del aprovechamiento energético hasta valores del orden de 70%–90% (IEA Bioenergy, s. f.).

El desempeño del sistema depende no solo del diseño de la planta, sino también de las propiedades del combustible. Batista et al. (2023) destacan que la eficiencia de la combustión está condicionada por factores como el contenido de humedad, la fracción de materia inorgánica de la biomasa, la relación aire-combustible y la interacción sólido-gas. En el caso de biomasa herbácea o residuos agroindustriales, los autores mencionan estrategias de acondicionamiento como la densificación o el

lavado para reducir inorgánicos solubles, y el uso de aditivos para mitigar problemas operativos asociados a las cenizas. Desde el punto de vista económico, Caputo et al. (2005) analizan el aprovechamiento energético de subproductos agrícolas, residuos agroindustriales y residuos de madera mediante plantas de combustión de entre 5 y 50 MW. Los autores señalan que la opción basada en combustión tiende a ser más rentable debido a su menor requerimiento de capital frente a alternativas más complejas, aunque el resultado es sensible a la escala de la planta y a parámetros logísticos como distancias, costos de transporte y disponibilidad efectiva de biomasa.

## **2.7. Fundamentos de modelado matemático**

La cadena de suministro de biomasa involucra múltiples actores, flujos de materiales y decisiones interrelacionadas, lo que dificulta su análisis mediante enfoques exclusivamente descriptivos. En este contexto, el uso de modelos matemáticos permite representar el sistema de manera estructurada bajo criterios cuantificables.

Un modelo puede entenderse como una representación abstracta y simplificada de un sistema real. Un modelo matemático se construye a partir de ecuaciones y restricciones que describen el comportamiento del sistema y sus limitaciones. Este enfoque permite analizar el problema de forma sistemática, comparar escenarios y respaldar las decisiones con fundamentos cuantitativos (Vitoriano & Ramos, 2023).

Los modelos matemáticos pueden clasificarse bajo distintos criterios. Una primera distinción se relaciona con el origen de la información utilizada. Los modelos heurísticos se basan en el conocimiento de los mecanismos que explican el fenómeno y los modelos empíricos se apoyan principalmente en datos observados o resultados experimentales (Hillier & Lieberman, 2001).

Otra clasificación se vincula con el tipo de resultado que se busca obtener. Los modelos cualitativos tienen un propósito principalmente descriptivo o exploratorio, orientado a identificar patrones o relaciones del sistema, por otra parte, los modelos cuantitativos, buscan obtener resultados numéricos precisos que permitan evaluar alternativas de decisión (Pelekais, 2000).

Asimismo, los modelos pueden diferenciarse según el tratamiento de la incertidumbre. Cuando incorporan variables aleatorias o parámetros inciertos se habla de modelos estocásticos, en los que el interés se centra en caracterizar probabilidades y riesgos asociados a distintos resultados. En contraste, los modelos deterministas asumen que todos los parámetros del sistema son conocidos con certeza y producen resultados exactos para un conjunto dado de datos (Hillier & Lieberman, 2001).

Otra forma de clasificación se relaciona con el objetivo del análisis. En este sentido, los modelos suelen agruparse en modelos de simulación, de decisión bajo incertidumbre y de optimización. Los modelos de simulación buscan reproducir el comportamiento de un sistema bajo determinados escenarios para comprender su desempeño. Los modelos de decisión bajo incertidumbre evalúan alternativas cuando no se dispone de información completa o intervienen factores aleatorios, incorporando el riesgo en el proceso de decisión. Por su parte, los modelos de optimización se enfocan en encontrar la mejor alternativa posible dentro de un conjunto de soluciones factibles, respetando restricciones y criterios de desempeño (Hillier & Lieberman, 2001).

Finalmente, los modelos también pueden clasificarse según la forma en que representan el tiempo. Los modelos estáticos describen el sistema en un único instante o período, sin considerar cambios temporales. En cambio, los modelos multi-período dividen el horizonte de planificación en varios intervalos y permiten que las decisiones y variables, como producción, flujos o inventarios, evolucionen entre períodos.

### **2.7.1. Casos de aplicación**

Diversos trabajos han aplicado modelos de optimización al diseño de redes de biomasa, considerando

distintos niveles de detalle, escalas geográficas y configuraciones tecnológicas.

Un primer caso relevante es el de Albashabsheh (2018), quien desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para optimizar una cadena de suministro de biomasa lignocelulósica destinada a la producción de biocombustibles. El modelo contempla múltiples tipos de biomasa, distintas formas físicas del material y el uso de unidades móviles de densificación. Además, incorpora decisiones de los productores sobre el suministro de biomasa, por lo que el problema no se restringe únicamente a la logística. Los resultados muestran que, bajo las condiciones evaluadas, la densificación móvil no resulta económicamente conveniente. No obstante, los análisis de sensibilidad indican que podría volverse viable ante reducciones moderadas en los costos de densificación o en ciertos costos fijos y de traslado. Este antecedente es especialmente relevante para esta tesis, ya que analiza de forma explícita la relación entre dos efectos contrapuestos: la reducción del transporte al procesar la biomasa cerca de su origen y el aumento de los costos operativos asociado al uso de tecnología móvil.

Un segundo antecedente es el de Psathas et al. (2022), quienes proponen una metodología para optimizar el diseño de una red descentralizada compuesta por instalaciones fijas y móviles. El modelo considera la incertidumbre en la disponibilidad de biomasa, la estacionalidad y la dispersión geográfica del recurso, e incorpora tecnología de pirólisis rápida móvil. Este caso muestra que la conveniencia de una red descentralizada no depende únicamente de las distancias de transporte, sino también de la variación temporal de la oferta, de la escala de procesamiento y de la forma en que la biomasa dispersa se articula con los nodos de conversión. En este sentido, evidencia que la configuración óptima de la red surge de la interacción entre geografía, tecnología y operación.

En una línea más enfocada en la logística territorial, Tauro et al. (2022) presentan un caso de estudio orientado a la optimización de los costos de transporte para el aprovechamiento energético de la biomasa. El trabajo integra análisis espacial con un modelo matemático que minimiza los costos entre distintos nodos de la cadena productiva, evaluando escenarios de oferta y demanda. Su principal aporte radica en mostrar una aplicación concreta en la que la dimensión geográfica se incorpora de manera explícita al problema de decisión.

Finalmente, el trabajo de O'Neill, Geissler y Maravelias (2024) presenta un caso de optimización de una red bioenergética a gran escala. El modelo representa de forma integrada la oferta espacial de biomasa, los puntos intermedios de preprocesamiento y las biorrefinerías. En particular, considera que la biomasa puede enviarse directamente a la planta final o pasar primero por un punto intermedio donde se seca y densifica para mejorar su transporte y almacenamiento. Además, incorpora decisiones sobre localización y capacidad de plantas intermedias y biorrefinerías, así como sobre los costos de transporte y procesamiento. Este antecedente resulta especialmente pertinente para esta tesis porque muestra que la conveniencia de incorporar etapas intermedias de pretratamiento depende de la distribución espacial del recurso y de su articulación con la red logística. Los resultados evidencian que el desempeño del sistema no depende solo de la cantidad de biomasa disponible, sino también de su localización y de la forma en que se organiza su traslado y procesamiento dentro de la red.

### **2.7.2. Modelado de plantas móviles**

Dado que el presente trabajo incorpora el estudio de unidades de densificación móvil como elemento diferencial dentro de la cadena de suministro, resulta relevante revisar cómo la literatura ha abordado matemáticamente su representación en modelos de optimización. Se identifican tres enfoques metodológicos principales.

Un primer enfoque consiste en utilizar variables binarias asociadas al tiempo y al nodo, que indican si una planta se encuentra ubicada en un determinado sitio durante un intervalo específico. Albashabsheh (2018) y Psathas et al. (2022) emplean este tipo de formulación, permitiendo que el modelo decida la localización temporal de las unidades de procesamiento. De esta manera, la infraestructura puede modificarse según su disponibilidad estacional, optimizando el transporte en

función de dónde y cuándo se genera la materia prima.

Un segundo enfoque incorpora costos de traslado y de puesta en marcha de las plantas móviles dentro de la función objetivo. Jacobson et al. (2021) modelan el sistema de modo que cada cambio de ubicación de la planta genera un costo adicional, asociado al desmontaje, transporte y reinstalación de la unidad. Esto obliga al sistema a equilibrar el ahorro en flete de biomasa frente al gasto de desarmar y mover la unidad.

Finalmente, algunos trabajos abordan el problema desde la perspectiva del procesamiento descentralizado. Psathas et al. (2022) plantean un modelo donde las unidades móviles operan con capacidades menores que las plantas fijas tradicionales, renunciando a las economías de escala. Sin embargo, al ubicarse cerca del origen del residuo, estas unidades permiten procesar materiales voluminosos y de baja densidad directamente en el sitio de generación. Los resultados muestran que la reducción en los costos de transporte de biomasa sin procesar puede compensar el mayor costo operativo individual de equipos de menor escala.



### **3. Caso de Estudio**

A partir de los fundamentos conceptuales desarrollados en el capítulo anterior, se presenta el caso de estudio sobre el cual se aplica el modelo de optimización desarrollado. Se describe el contexto geográfico e industrial del problema, los actores involucrados, las fuentes de biomasa consideradas y los supuestos adoptados para su definición.

#### **3.1. Residuos considerados**

Para definir los residuos a analizar se prioriza su viabilidad técnica y logística para procesos de valorización energética. A partir de la preselección inicial presentada en el marco teórico, se eligieron tres flujos residuales: contenido ruminal generado en frigoríficos, cáscara de arroz proveniente de molinos arroceros y residuos de aserraderos.

La selección se basa en cuatro criterios. En primer lugar, se considera su potencial energético, asociado a un poder calorífico competitivo frente a otros residuos agroindustriales. En segundo lugar, se valora que su generación ocurra en puntos fijos e identificables, frigoríficos, molinos y aserraderos, lo que facilita su registro, recolección y transporte, dado que estos establecimientos suelen disponer de infraestructura básica para manejo, carga y almacenamiento. En tercer lugar, se tiene en cuenta la disponibilidad de información sobre volúmenes anuales generados, condición necesaria para estimar el potencial energético con precisión. En cuarto lugar, se considera la existencia de zonas de intersección territorial donde coinciden dos o más de estos residuos.

En cuanto al destino actual de estos residuos, el panorama es heterogéneo. Los residuos de aserradero presentan el mayor nivel de aprovechamiento, destinándose en ciertos casos a la generación energética o a la industria de celulosa. No obstante, este aprovechamiento se concentra principalmente en esquemas integrados de grandes empresas forestales, mientras que los aserraderos medianos y pequeños, que constituyen la mayor parte de los puntos de generación considerados en este trabajo, enfrentan mayores limitaciones para valorizar sus residuos. Por su parte, la cáscara de arroz cuenta con casos de valorización consolidados a escala industrial, como la planta Galofer; sin embargo no logra aprovechar la totalidad del volumen de residuo generado en el país. El contenido ruminal, en cambio, presenta el menor grado de aprovechamiento: si bien existen experiencias aisladas, no se observa una adopción generalizada en el sector frigorífico, predominando su disposición en campo abierto sin recuperación de valor.

Se decide excluir los rastrojos de cosecha y los residuos de la actividad forestal dispersa. Su generación es difusa, la recolección requiere equipamiento adicional y mayores costos logísticos, y existe además una restricción ecológica y agronómica de mantener una fracción sobre el suelo para proteger su estructura, conservar nutrientes y reducir la erosión.

Una vez definidos los residuos, se avanza en la recolección de datos sobre los puntos de generación a nivel nacional, construyendo una base de datos georreferenciada que incluye todos los frigoríficos, aserraderos y molinos arroceros registrados en Uruguay. Para cada establecimiento se releva el nombre, la ubicación, el volumen anual estimado de residuo generado y una estimación del potencial energético disponible, calculada a partir del poder calorífico en base húmeda de cada residuo y de los volúmenes relevados, ajustados por tasas de aprovechamiento que representan la fracción efectivamente recuperable. Dicha información se encuentra detallada en el [Anexo II](#).

#### **3.2. Zona de estudio**

La selección de la zona de estudio se realiza a partir de un análisis geoespacial que combina la distribución territorial de los puntos de generación con criterios de viabilidad logística y potencial energético.

### 3.2.1. Metodología de selección

A partir de los datos georreferenciados de los puntos de generación de residuos seleccionados, se desarrolla un modelo computacional en Python, con el objetivo de identificar las zonas del país con mayor concentración de energía disponible. Este análisis tiene un alcance exploratorio y geográfico, no busca optimizar la cadena logística, sino determinar en qué regiones del país se justifica profundizar el estudio. Para ello es necesario determinar un radio de agrupación que permita considerar puntos de generación cercanos, de forma tal que el transporte de los residuos hasta una planta centralizada sea viable desde el punto de vista energético.

Para establecer ese radio, se lleva a cabo un análisis que compara la energía contenida en un camión cargado con un único tipo de residuo con la energía consumida durante su transporte, considerando la capacidad de carga de un camión estándar, el poder calorífico del residuo, el rendimiento energético del diésel y el consumo promedio de combustible por kilómetro. El objetivo es estimar la distancia máxima que un camión puede recorrer sin que el consumo energético del transporte supere la energía contenida en la carga transportada.

Los resultados muestran que el contenido ruminal permite el mayor rango de transporte con balance energético positivo, alcanzando hasta 77 km, seguido por los residuos de aserradero con 59 km, y la cáscara de arroz con 26 km. Con el fin de no subestimar la posibilidad de captación en regiones con alta disponibilidad de biomasa, se toma como referencia el mayor de estos valores y se define un radio de agrupación territorial de 38,5 km (equivalente a la mitad de dicho valor) de modo que la distancia máxima entre dos puntos dentro de cada círculo no supere los 77 km.

A partir de este radio, el algoritmo recorre el territorio nacional generando círculos de análisis y calculando la energía total contenida dentro de cada uno. De este modo, se identifican áreas que cumplen simultáneamente con los criterios de viabilidad de transporte y disponibilidad energética, constituyendo una primera aproximación para la selección del caso de estudio. Como resultado, se identifican cuatro regiones con mayor potencial energético: dos zonas en el noreste del país (Tacuarembó y Rivera), una en el sur (Montevideo, Canelones y zonas cercanas) y otra en el litoral oeste (Paysandú, Salto y Río Negro), tal y como se visualiza en la Figura 3.1. Estas tres zonas fueron seleccionadas como escenarios comparativos para las etapas posteriores del estudio.

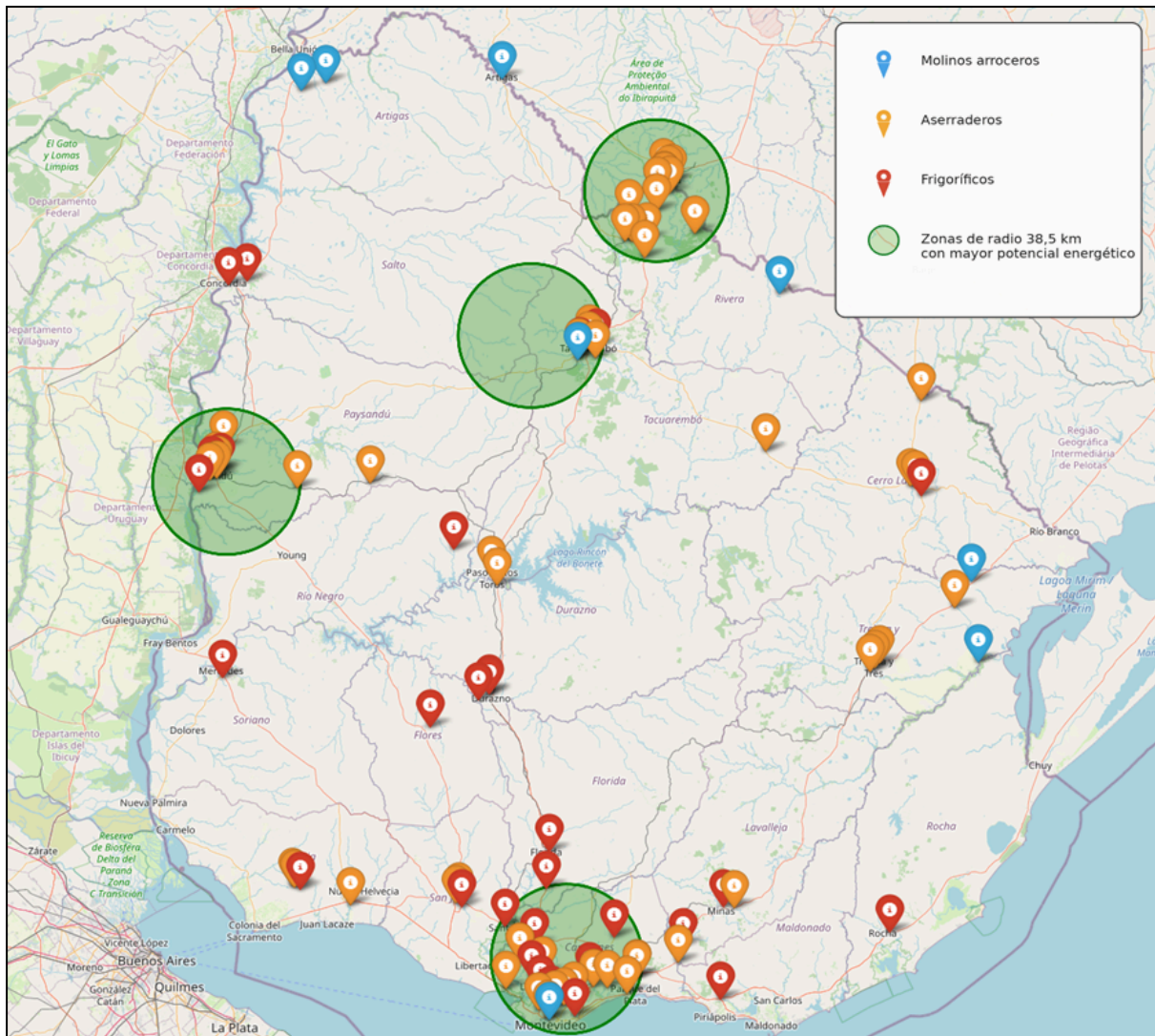


Figura 3.1. Mapa con puntos de generación y zonas con mayor potencial energético.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se desarrolla un segundo módulo del modelo destinado a calcular el baricentro energético ponderado de cada zona. Este punto se define como la ubicación geográfica que minimiza la distancia promedio, ponderada por la energía aportada desde cada punto de generación. El baricentro constituye una primera aproximación teórica a la localización óptima de la planta final de valorización energética. Dado que este cálculo es puramente geométrico, el punto resultante puede ubicarse en zonas rurales sin acceso adecuado, por lo que se realiza un ajuste manual hacia la ruta nacional más cercana para garantizar la viabilidad logística. Luego se implementa un tercer módulo orientado al cálculo de distancias entre cada punto de generación y el baricentro ajustado de cada una de las zonas. Para obtener una estimación realista de los trayectos de transporte, se relevan manualmente las 76 distancias efectivas por ruta utilizando la herramienta Google Maps. Estas distancias se utilizan como insumo para la estimación de los costos logísticos asociados al transporte de biomasa hacia la planta de valorización.

Con el objetivo de facilitar la comparación entre las zonas, los resultados se expresan mediante un indicador de costo específico en \$UY/MWh, que representa el costo de transportar una unidad de energía potencial desde cada generador hasta el centro logístico del sistema.

### 3.2.2. Zonas identificadas

El algoritmo identifica cuatro zonas con mayor potencial energético: Rivera, Tacuarembó, Sur y Oeste. Adicionalmente, se evalúa el caso combinado Rivera–Tacuarembó, que si bien no corresponde a uno de los círculos identificados por el algoritmo, se incorpora por la proximidad geográfica entre ambas zonas y con el objetivo de explorar configuraciones que incluyan puntos intermedios de densificación, permitiendo ampliar el rango de transporte de los residuos.

La Tabla 3.1 resume los indicadores de las cinco zonas evaluadas. Cabe aclarar que el potencial energético se expresa en términos brutos, sin descontar pérdidas por eficiencia de conversión ni otros factores operativos, con el único fin de comparar las zonas en igualdad de condiciones. El costo logístico, por su parte, corresponde a una estimación simplificada orientada a la comparación relativa entre zonas, y no a un cálculo preciso de costos de transporte.

*Tabla 3.1. Resultado de estudio de zonas.*

Zona	KPI (\$UY/MWh)	Potencial (MWh)	Costo logístico (\$UY)	# Puntos de recolección
Rivera	1,88	568.120	1.066.161	8
Tacuarembó	0,58	460.265	266.299	7
Rivera - Tacuarembó	4,4	1.364.182	6.060.901	22
Sur	4,3	271.219	1.159.058	18
Oeste	2,4	164.151	400.155	6

La zona de Rivera concentra su potencial en 8 aserraderos, con alta concentración en tres establecimientos principales y distancias moderadas. El caso ubicado en Tacuarembó presenta el mejor indicador logístico, con puntos de generación muy próximos entre sí y oferta concentrada en dos establecimientos principales. El caso Rivera–Tacuarembó no solo combina los puntos seleccionados en los casos individuales, sino que además incorpora aquellos puntos de generación que habían quedado en el límite de las zonas y no fueron considerados al evaluarlas por separado, alcanzando un total de 22 puntos. Esta ampliación territorial incrementa los costos de transporte respecto a los casos individuales, aunque concentra el mayor potencial energético total. La zona sur está dominada por el molino Saman Montevideo, que aporta aproximadamente la mitad del potencial total, y presenta mayor dispersión territorial que las zonas del noreste, lo que se refleja en un indicador más elevado. La zona oeste es la de menor potencial energético y mayor dispersión entre sus puntos de generación.

### 3.2.3. Zona seleccionada

Se selecciona el caso Rivera–Tacuarembó como caso de estudio. Si bien este escenario presenta un indicador de costo específico más elevado que los casos individuales, concentra el mayor potencial energético y la red más extensa de puntos de generación, conformada por 18 aserraderos, 2 molinos arroceros y 2 frigoríficos. Esta configuración lo convierte en un caso desafiante desde el punto de vista logístico, que permite analizar las decisiones de diseño de la red y evaluar el rol potencial de plantas de densificación intermedias para mejorar la eficiencia del sistema.

## 3.3. Red logística

La red logística se estructura a partir de tres componentes principales: los puntos de generación, donde se origina la biomasa disponible, las plantas de densificación intermedia, tanto fijas como móviles,

donde pueden aplicarse tecnologías de pretratamiento, y las plantas finales, donde se realiza la valorización energética de los residuos. A continuación se describe cada componente.

### 3.3.1. Puntos de generación

El caso Tacuarembó–Rivera cuenta con 22 puntos de generación. La Figura 3.2 detalla el listado completo, mientras que la Figura 3.3 presenta su distribución geográfica, evidenciando la concentración de los aserraderos en el departamento de Rivera y la presencia de frigoríficos y molinos en Tacuarembó.

Aserraderos					
1. Frutifor/Arboreal	4. Depósito Iporá	7. Camponil	10. Nortimber	13. Dank S.A.	16. JCE
2. Andy Martínez	5. Lagunón	8. Urufor	11. Imnsur	14. Batovi Soc. Agropecuaria	17. Tranqueras
3. Olecor	6. Sergio Acosta	9. Tingelsur	12. Shama SRL	15. Aserradero Leira	18. Varbell
Frigoríficos					
1. Frigorífico Tacuarembó					
2. Luchasol S.A.					
Molinos arroceros					
1. Damboriarena Ecosteguy S.R.L.					
2. Saman - Planta Tacuarembó					

Figura 3.2. Puntos de generación del modelo.

Fuente: Elaboración propia.

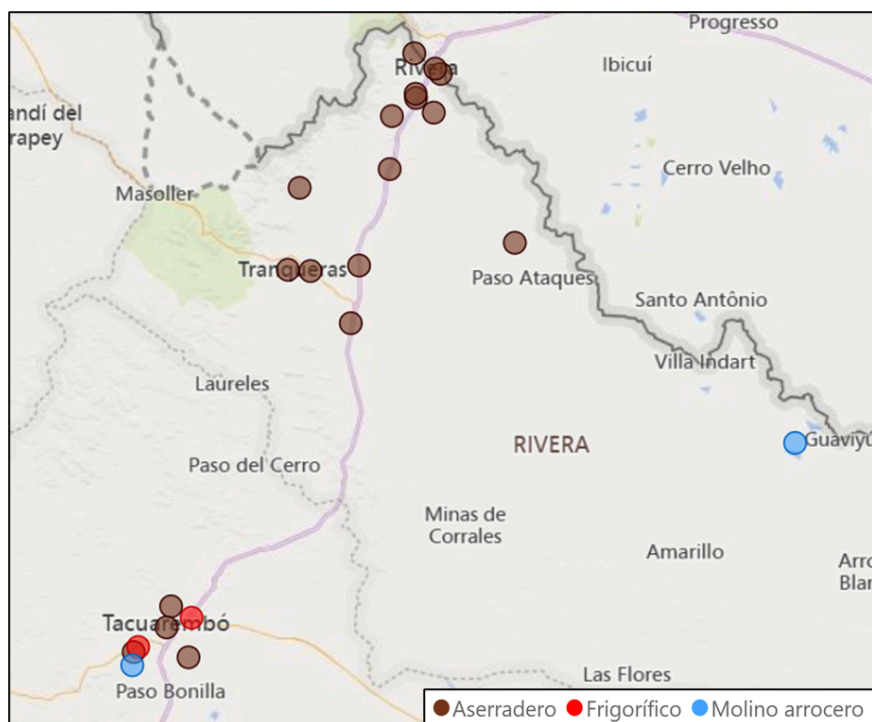


Figura 3.3. Distribución geográfica de los puntos de generación.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2. Plantas finales

Las plantas finales corresponden a instalaciones de valorización energética que aprovechan residuos de biomasa mediante combustión para la generación de energía eléctrica, cuya caracterización técnica fue presentada en la Sección 2.6. Dado que una planta de este tipo requiere que el sitio de instalación

cumpla determinadas condiciones, estos requisitos se incorporan como criterios de selección para definir las localizaciones candidatas.

En primer lugar, se establece que la planta final debe localizarse sobre las Rutas Nacionales N° 5, 26 o 29, por ser los principales ejes viales de la zona, lo que reduce tiempos de viaje, desvíos o costos asociados a accesos secundarios. En segundo lugar, se considera la proximidad a cauces de agua, necesaria para la operación de la planta en sistemas de enfriamiento, generación de vapor y servicios auxiliares. Los cursos de agua identificados en la zona que intersectan dichas rutas son: Arroyo Tres Cruces, Río Tacuarembó, Arroyo Cuñapirú, Arroyo Tacuarembó Chico y Arroyo Tranqueras.

Con el fin de evaluar si dichos cursos de agua cuentan con la disponibilidad suficiente para abastecer la planta, se estima el caudal de agua requerido a partir del potencial energético anual de la zona. Adoptando un valor de eficiencia eléctrica de 28% sobre los 1.364.182 MWh/año disponibles, se obtiene una producción eléctrica anual de 313.761,86 MWh/año. Asumiendo una disponibilidad de operación del orden de 8.000 horas/año debido a paradas en la operación (Retema, 2020), se estima una potencia instalada de 39,2 MW. El volumen anual de agua requerido se estima mediante la relación simplificada utilizada en estudios nacionales de biomasa (KPMG Sociedad Civil & SEG Ingeniería, 2015):  $Agua(m^3) = 4 \times Energía\ generada(MW)$ , resultando en 1.255.047 m<sup>3</sup>/año, lo que equivale a un caudal de 156,9 m<sup>3</sup>/h.

En paralelo, para asegurar un uso sostenible del recurso hídrico, se considera el concepto de caudal ambiental, entendido como el caudal mínimo que debe mantenerse en el curso de agua para asegurar la conservación de los ecosistemas. Álvarez Villanueva y Huamán Vidaurre (2022) señalan que los métodos estadísticos basados en curvas de permanencia permiten estimar el caudal ecológico a partir de registros históricos de caudal de estaciones hidrométricas, lo cual resulta útil cuando no se dispone de estudios detallados. Como aproximación práctica, se utilizan parámetros de curvas de frecuencia de caudales diarios, donde es habitual utilizar cuantiles como el Q80 (caudal excedido el 80% del tiempo) para representar periodos de bajo caudal y evaluar la disponibilidad de agua (DINAGUA, 2025; Ministerio de Ambiente, 2025).

Con estos elementos, se verifica que el caudal disponible en cada curso de agua es suficiente para cubrir el requerimiento estimado de la planta, manteniendo al mismo tiempo un margen de protección asociado al caudal ambiental. Como referencia adicional, el Estudio de Impacto Ambiental y Social de UPM (2018) indica que el uso de agua en promedio anual a largo plazo es menor al 1% del caudal promedio del río a la altura de Paso de los Toros. En comparación con este criterio, los valores estimados en este trabajo muestran que el Arroyo Tranqueras no cumple con la referencia mencionada de UPM, motivo por el cual se descarta como ubicación viable para la planta. Los resultados de la investigación se ven reflejados en el [Anexo III](#). Como elemento adicional, a considerar en futuras evaluaciones, la planta deberá contar con tanques de reserva de agua que permitan amortiguar los periodos de menor caudal y asegurar la continuidad operativa.

A partir de las restricciones de ruta y cercanía a cauces de agua, se selecciona un conjunto preliminar de padrones ubicados sobre o próximos a las intersecciones entre las rutas y los cursos de agua considerados, identificados geográficamente sobre el visualizador geoCatastro del Ministerio de Economía y Finanzas (Dirección Nacional de Catastro, s. f.).

Sobre esta preselección se construye una matriz que evalúa distintos atributos ponderados, para jerarquizar las alternativas y seleccionar los padrones más adecuados. Los atributos considerados en la matriz son: caudal del curso de agua, cercanía al curso de agua, riesgo de inundación, cercanía y acceso a la ruta, cercanía a la vía férrea, uniformidad del terreno, presencia de instalaciones existentes, superficie del padrón y costo de la tierra. A cada atributo se le asigna un peso relativo en una escala de 1 a 5, de acuerdo con su incidencia en la factibilidad y el desempeño esperado de la planta. A la vez, cada atributo se evalúa mediante una escala de 1 a 3, donde el 3 representa la condición más favorable. La matriz de evaluación utilizada se detalla en el [Anexo III](#).

Los cinco padrones seleccionados se presentan en la Tabla 3.2 y constituyen las localizaciones candidatas para la planta final de valorización energética en el modelo.

*Tabla 3.2. Padrones seleccionados del análisis para la localización de la planta final.*

#	Padrón	Ubicado sobre curso de agua	Ubicado sobre ruta nacional
1	800	Arroyo Tres Cruces	Ruta Nacional N°5
2	946	Río Tacuarembó	Ruta Nacional N°5
3	628	Río Tacuarembó	Ruta Nacional N°29
4	2003	Arroyo Cuñapirú	Ruta Nacional N°5
5	779	Arroyo Tacuarembó Chico	Ruta Nacional N°5

### 3.3.3. Plantas de densificación fijas y móviles

Las opciones de densificación consideradas en el modelo son el peletizado, el briquetado y el triturado, por representar distintos niveles de procesamiento con diferentes requerimientos técnicos, costos y efectos sobre la logística del sistema. El enfardado se excluye por ser más apropiado para residuos herbáceos, y la torrefacción queda fuera del alcance por su mayor complejidad operativa y menor experiencia de aplicación a nivel local.

Para determinar las ubicaciones candidatas de plantas de densificación fija se utiliza la red vial real de la región, bajo el criterio de que una planta de densificación resulta razonable sobre los caminos que conectan los puntos de generación con la planta final. En particular, dado que la Ruta Nacional N°5 constituye el principal corredor logístico del área de estudio, se impone como condición que todas las ubicaciones candidatas se sitúen sobre dicha ruta, asegurando la conectividad con los puntos de generación y la planta final de valorización energética.

Las ubicaciones candidatas se seleccionan mediante un algoritmo de máxima dispersión geográfica, detallado en el [Anexo IV](#). El primer nodo seleccionado es el más cercano al centroide de la región de estudio. A partir de dicho nodo inicial, el algoritmo incorpora iterativamente el punto más alejado del conjunto ya seleccionado, con una separación mínima de 5 km entre candidatos. De esta forma, cada nuevo nodo se elige para maximizar la cobertura geográfica del corredor, resultando en una distribución uniforme de las ubicaciones candidatas a lo largo de la Ruta N°5. Se incorporan además como ubicaciones candidatas los cinco proveedores con mayor volumen de generación y aquellos que superan la distancia máxima de transporte hacia cualquier planta final. En estos últimos casos, la densificación intermedia no constituye una opción logística, sino una condición necesaria para poder integrarse al sistema. El algoritmo permite definir la cantidad de nodos candidatos a considerar; en este caso de estudio se consideraron 16, distribuidos a lo largo del corredor Rivera–Tacuarembó.

Las plantas móviles representan el componente flexible de la cadena logística. A diferencia de las instalaciones fijas, pueden relocalizarse entre períodos para adaptarse a las variaciones en los flujos de biomasa. En particular, el caso de estudio contempla hasta cuatro unidades móviles, cada una con capacidad de instalarse en cualquiera de los nodos candidatos previamente definidos.

### 3.3.4. Transporte

Para el transporte de biomasa cruda y densificada, se define el uso de camiones estándar, por ser el medio que mejor se ajusta a las condiciones operativas consideradas. En particular, el transporte carretero ofrece mayor flexibilidad para la carga y descarga en los puntos de generación y consumo, se adapta a la red vial y presenta buena competitividad en costos para las distancias y volúmenes

contemplados. No se considera el uso del ferrocarril ni las barcazas dado que las distancias del caso de estudio reducen sus ventajas competitivas. Por otra parte, se descarta también el uso de bitrenes o tritrenes debido a limitaciones de accesibilidad y operación, y los camiones eléctricos o a hidrógeno por restricciones de autonomía operativa y disponibilidad de infraestructura de recarga en la zona. Estas alternativas se identifican como oportunidades de mejora para estudios futuros.

### 3.4. Síntesis del caso de estudio

El caso de estudio queda definido por los siguientes componentes, que constituyen los datos de entrada del modelo matemático desarrollado en el capítulo siguiente. Se consideran 22 puntos de generación georreferenciados: 18 aserraderos, 2 molinos arroceros y 2 frigoríficos, localizados en el corredor noreste de Uruguay entre los departamentos de Tacuarembó y Rivera, con la Ruta Nacional N° 5 como eje principal. La red logística contempla 6 localizaciones candidatas para la planta de valorización energética final, 16 nodos candidatos para plantas de densificación fija y hasta 4 unidades de densificación móvil. Las tres alternativas de densificación evaluadas son triturado, peletizado y briquetado, y la vía de valorización adoptada es la generación de energía eléctrica mediante combustión de biomasa en caldera de vapor acoplada a turbina de generación. El transporte de biomasa se realiza mediante camiones estándar.

#### 3.4.1. Principales valores

Además de describir las características de los distintos conjuntos que componen el caso de estudio, en la Tabla 3.3 se presentan los principales parámetros numéricos utilizados como insumo para la formulación y posterior aplicación del modelo matemático. Para un mayor nivel de detalle en cálculos realizados, se hace referencia al [Anexo VI](#).

*Tabla 3.3. Principales valores del caso de estudio.*

Parámetro	Valor	Referencia
Precio de adquisición de biomasa	USD 30/ton	Consulta a profesionales del rubro
Precio de venta de energía	78 USD/MWh	(El País, 2007). Para mayor detalle ver <a href="#">Anexo VI</a> .
Eficiencia energética en planta final	28%	(Pena et al., 2017).
Costo de operación planta final	46,3 USD/ton	(Martínez, 2018). Para mayor detalle ver <a href="#">Anexo VI</a> .
Costo de operación planta de densificación fija	17,5 USD/ton	(RICHI Machinery, s. f.) Para mayor detalle ver <a href="#">Anexo VI</a> .

### 3.5. Supuestos

Para la formulación del caso de estudio y su modelado se adoptan los siguientes supuestos:

- Se asume que la biomasa relevada en cada punto de generación está disponible para ser incorporada a la red, bajo el costo de adquisición establecido y dentro del horizonte de planificación analizado, sin destinarse a usos alternativos.
- Se asume que el contenido ruminal ha sido sometido a un proceso de secado previo a su ingreso a la planta final de valorización energética.

- En los procesos de pelletizado y briquetado, se asume que el material ingresa en condiciones adecuadas de humedad y granulometría para ser procesado.
- Se asume que la densificación conjunta de cáscara de arroz y residuos de aserradero es técnicamente viable. Según Bajo y Acda (2017), ambos materiales pueden mezclarse para producir pellets o briquetas con buenas propiedades, siempre que se controle la humedad y la granulometría. La determinación de las proporciones óptimas de mezcla queda fuera del alcance de este trabajo.
- Se asume que, del total de residuos de aserradero disponibles, solo los costaneros, cortezas y despuntes, que representan el 40% del total, pueden destinarse a la alternativa de triturado, dado que el resto ya presenta una granulometría menor a la que se obtiene luego de ese proceso.
- Se asume que todas las posibles ubicaciones para la planta final y las planta de densificación están disponibles para su adquisición.
- El transporte se modela como flujo entre nodos de la red y no como un problema de ruteo de vehículos. En consecuencia, no se modelan recorridos específicos, secuencias de recolección, consolidación de cargas, ventanas horarias ni restricciones operativas detalladas de la flota.
- Se asume que los camiones estándar pueden circular tanto por rutas nacionales como por caminos secundarios sin necesidad de cambio de vehículo, considerando que las distancias en caminos de acceso a los puntos de generación son reducidas.
- Los costos de transporte se calculan a partir de distancias y costos unitarios, sin contemplar ineficiencias operativas como desvíos, demoras, accidentes o tiempos muertos.
- Se asume que cada mes tiene 28 días de trabajo con operación continua de 24 horas, resultando en 8.064 horas anuales de operación efectiva, tanto para la planta térmica como para la logística de recolección.



## 4. Modelo Matemático

A continuación se presenta el desarrollo del modelo matemático propuesto, el cual constituye la herramienta fundamental para la evaluación y comparación de los escenarios operacionales considerados en el presente trabajo. El modelo adoptado es de carácter cuantitativo, determinista y multi-período, formulado como un programa de optimización matemática. Esta elección responde a que la mayoría de los parámetros del sistema se encuentran definidos con suficiente certeza como para prescindir de un tratamiento estocástico, y a que el objetivo central es identificar la configuración óptima de la cadena de suministro en términos de localización, flujos, costos y energía obtenida a lo largo de un horizonte temporal de doce meses.

### 4.1. Formulación matemática

#### 4.1.1. Conjuntos

La Tabla 4.1 presenta los conjuntos que componen el modelo matemático, junto con sus respectivos índices.

*Tabla 4.1. Conjuntos del modelo.*

Notación	Descripción
$P$	Puntos de generación de residuos, $p \in P$
$P^{CA} \subseteq P$	Puntos de generación correspondientes a cáscara de arroz, $p \in P^{CA}$
$P^{FR} \subseteq P$	Puntos de generación correspondientes a frigoríficos, $p \in P^{FR}$
$P^{AS} \subseteq P$	Puntos de generación correspondientes a aserraderos, $p \in P^{AS}$
$D$	Tecnologías de densificación, $d \in D$
$N$	Ubicaciones candidatas para plantas de densificación, $n \in N$
$F$	Ubicaciones candidatas para plantas finales de valorización energética, $f \in F$
$T$	Períodos de generación, $t \in T$
$K$	Densificadoras móviles, $k \in K$

Las ubicaciones candidatas para plantas de densificación pueden ser ocupadas por plantas de densificación fijas o por densificadoras móviles. El conjunto de densificadoras móviles corresponde al conjunto de equipos disponibles que pueden ser asignados dinámicamente a las distintas ubicaciones en cada período del horizonte de planificación.

Los subconjuntos  $P^{CA}$ ,  $P^{FR}$  y  $P^{AS}$  particionan el conjunto  $P$  de la siguiente forma:

$$P^{CA} \cup P^{FR} \cup P^{AS} = P$$

$$P^{CA} \cap P^{FR} = P^{CA} \cap P^{AS} = P^{FR} \cap P^{AS} = \emptyset$$

#### 4.1.2. Parámetros

Los parámetros del modelo representan los datos de entrada del sistema, se detallan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros del modelo.

Parámetro	Descripción	Unidad
$Q_{p,t}$	Disponibilidad de biomasa en punto de generación $p$ en el período $t$	ton
$W_p$	Densidad de residuo generado en el punto de generación $p$ sin densificar	ton/m <sup>3</sup>
$F_p$	Factor de conversión de toneladas a potencial energético del punto de generación $p$ sin densificar	MWh/ton
$DM_p$	Distancia máxima a transportar el residuo del punto de generación $p$ sin densificar	km
$W_{p,d}$	Densidad del residuo generado en el punto de generación $p$ y densificado por método de densificación $d$	ton/m <sup>3</sup>
$F_{p,d}$	Factor de conversión de toneladas a potencial energético del punto de generación $p$ por método de densificación $d$	MWh/ton
$DMD_{p,d}$	Distancia máxima a transportar el residuo densificado por método de densificación $d$ proveniente del punto de generación $p$	km
$E_d$	Energía requerida para densificar en densificadora fija con método de densificación $d$	MWh/ton
$E'_d$	Energía requerida para densificar en densificadora móvil con método de densificación $d$	MWh/ton
$P_d$	Porcentaje de toneladas que son perdidas por densificar con método de densificación $d$	%
alpha	Porcentaje de toneladas de residuo de punto de generación $p \in P^{AS}$ que pueden densificarse por método de densificación <i>Triturado</i>	%
$DD_{p,n}$	Distancia desde punto de generación $p$ hasta planta de densificación ubicada en $n$	km
$DG_{p,f}$	Distancia desde punto de generación $p$ hasta planta final ubicada en $f$	km
$DF_{n,f}$	Distancia desde planta de densificación ubicada en $n$ hasta planta final ubicada en $f$	km
$B$	Costo de adquisición de biomasa	USD/ton
$V$	Precio de venta de energía	USD/MWh
IPF	Costo anual de inversión de planta final en función de las toneladas procesadas	USD/ton/año
IPFF	Costo fijo mensual de inversión de planta final	USD/mes
OPF	Costo de operación de planta final	USD/ton
UF	Porcentaje mínimo de utilización de capacidad para planta final	%
Ef	Eficiencia energética en planta final	%

N	Número de plantas finales	sin unidad
IPD	Costo anual de inversión de planta de densificación en función de las toneladas procesadas	USD/ton/año
IPDF	Costo fijo mensual de inversión de planta de densificación	USD/mes
OPD	Costo de operación de planta de densificación	USD/ton
UD	Porcentaje mínimo de utilización de capacidad para planta de densificación	%
IPD'	Costo anual de inversión de densificadora móvil (siendo un año 365 días, 12 meses)	USD/año
OPD' <sub>d</sub>	Costo de operación de densificadora móvil que utiliza método de densificación <i>d</i>	USD/ton
QD <sub>d</sub>	Capacidad de densificadora móvil que utiliza método de densificación <i>d</i>	ton/día
UM	Porcentaje mínimo de utilización de capacidad para densificadora móvil	%
C	Costo de transportar una densificadora móvil	USD/km
M <sub>n,n'</sub>	Distancia entre plantas de densificación ubicadas en <i>n</i> y <i>n'</i>	km
C <sub>1</sub>	Capacidad de camión en peso	ton/camión
C <sub>2</sub>	Capacidad de camión en volumen	m <sup>3</sup> /camión
Vel	Velocidad promedio de camión	km/h
CC	Costo de combustible de camión	USD/km
CD	Costo de salario del conductor	USD/h
CCD	Costo de carga/descarga de camión	USD/camión
CCC	Costo anual de compra de camión	USD/camión
CM	Costo de mantenimiento de camión	USD/km
TCD	Tiempo de carga/descarga	h/camión
D	Días del mes	días/mes
H	Horas por día	h/día

### 4.1.3. Variables de decisión

Las variables del modelo se clasifican en variables de decisión principales y variables auxiliares, siendo estas últimas dependientes de las primeras. Se presentan en las Tablas 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3. Variables del modelo

Variable	Descripción	Unidad
$t_{p,t}$	Toneladas a utilizar de punto de generación $p$ en el período $t$	ton
$Z_{p,n,f,t}$	1 si se densifican los residuos utilizados del punto de generación $p$ en la planta de densificación ubicada en $n$ y se envían a la planta final ubicada en $f$ en el período $t$ , 0 si no	binaria
$m_{k,n,t}$	1 si la densificadora móvil $k$ está operando en ubicación $n$ en el período $t$ , 0 si no	binaria
$u_n$	1 si se activa la planta de densificación en ubicación $n$ , 0 si no.	binaria
$d_d$	1 si se utiliza el método de densificación $d$ , 0 si no.	binaria
$f_f$	1 si se activa la planta final en ubicación $f$ , 0 si no.	binaria

Tabla 4.4. Variables dependientes del modelo.

Variable dependiente	Descripción	Unidad
$y_{p,f,t}$	1 si el residuo se envía directo desde el punto de generación $p$ hasta la planta final ubicada en $f$ en el período $t$ , 0 si no.	binaria
$PD_n$	Capacidad de planta de densificación ubicada en $n$	ton/mes
$PF_f$	Capacidad de planta final ubicada en $f$	ton/mes
NTC	Flota total de camiones	camiones/año
$m_{act_k}$	1 si la densificadora móvil $k$ se utiliza en cualquier período $t$ , 0 si no	binaria
$v_{k,n,n',t}$	1 si la densificadora móvil $k$ se mueve de ubicación $n$ a $n'$ entre el periodo $t-1$ y $t$ , 0 si no.	binaria

### 4.1.4. Cálculos auxiliares

Previo a la formulación de la función objetivo, se presentan los cálculos auxiliares asociados al sistema de transporte, necesarios para determinar el número de viajes requeridos y la cantidad de camiones.

#### 4.1.4.1. Capacidad efectiva de transporte

La capacidad efectiva de cada camión está limitada por restricciones de volumen y peso, se define como:

Capacidad efectiva sin densificar :  $C_p = \min \{C1; W_p * C2 \}$

Capacidad efectiva densificada:  $CD_{p,d} = \min \{C1; W_{p,d} * C2 \}$

#### 4.1.4.2. Dimensionamiento de flota de transporte

##### a) Tiempo de viaje

El tiempo total requerido para completar un viaje incluye el trayecto ida y vuelta, y los tiempos de carga y descarga:

- Tiempo total de viaje correspondiente al transporte directo desde el punto de generación  $p$  hasta la planta final ubicada en  $f$ .

$$TV_{p,f} = 2 * \left( \frac{DG_{p,f}}{Vel} + TCD \right)$$

- Tiempo total de viaje correspondiente al transporte desde el punto de generación  $p$  hasta la planta de densificación ubicada en  $n$ , posteriormente hacia la planta final ubicada en  $f$ .

$$TV_{p,n,f,t} = \left( \frac{DD_{p,n} + DF_{n,f}}{Vel} \right) + 4 * TCD + \left( \frac{DG_{p,f}}{Vel} \right)$$

##### b) Número máximo de viajes diarios

El número máximo de viajes que puede realizar un camión por día se determina a partir de la disponibilidad horaria de los conductores asumiendo turnos que completen un día.

- Número de viajes habilitados por día desde punto de generación  $p$  hasta planta final ubicada en  $f$ .

$$VD_{p,f} = \frac{H}{TV_{p,f}}$$

- Número de viajes habilitados por día desde punto de generación  $p$  hasta planta de densificación ubicada en  $n$ .

$$VD_{p,n,f,t} = \frac{H}{TV_{p,n,f,t}}$$

##### c) Número de camiones requeridos por día

El número de camiones necesarios por día para cada ruta se calcula como:

- Número de camiones por día desde punto de generación  $p$  hasta planta final ubicada en  $f$  en período  $t$ .

$$NC_{p,f,t} = \frac{t_{p,t} * y_{p,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,f})}$$

- Número de camiones por día desde punto de generación  $p$  hasta planta de densificación ubicada en  $n$  en período  $t$ .

$$NC_{p,n,f,t} = \frac{t_{p,t} * z_{p,n,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,n,f,t})}$$

En la función objetivo se expresan en función de las variables correspondientes.

#### d) Flota total requerida

El número total de camiones a adquirir corresponde al máximo requerimiento diario observado durante el horizonte de planificación. La variable correspondiente (*NTC*) se activa a partir de la restricción número 24 presentada en la Sección 4.1.6.

#### 4.1.5. Función objetivo

La función objetivo del modelo busca minimizar los costos totales del sistema maximizando el aprovechamiento del potencial energético de los residuos.

$$\begin{aligned} \min \quad & C^{biomasa} + C^{combustible + mantenimiento} + C^{camiones} + C^{conductor} \\ & + C^{operación planta densificación} + C^{inversión planta densificación} + C^{movimiento densificadora móvil} \\ & + C^{operación planta final} + C^{inversión planta final} \\ & - POT \end{aligned}$$

A continuación se desglosan los distintos componentes de la expresión:

##### 4.1.5.1. Costo de adquisición de biomasa

$$C^{biomasa} = B * (\sum_p \sum_t \sum_n \sum_f t_{p,t} * z_{p,n,f,t} + \sum_p \sum_t \sum_f t_{p,t} y_{p,f,t})$$

##### 4.1.5.2. Costo de combustible y mantenimiento

$$\begin{aligned} C^{combustible + mantenimiento} = & (CC + CM) * [\sum_p \sum_f \sum_t 2 * DG_{p,f} * \frac{t_{p,t} * y_{p,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,f})} \\ & + \sum_p \sum_n \sum_f \sum_t \frac{t_{p,t} * z_{p,n,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,n,f,t})} * (DD_{p,n} + DF_{n,f} + DG_{p,f})] \end{aligned}$$

##### 4.1.5.3. Costo de compra y carga/descarga de camiones

$$C^{camiones} = CCC * NTC + CCD * 2 * (\sum_p \sum_n \sum_f \sum_t 2 * \frac{t_{p,t} * z_{p,n,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,n,f,t})} + \sum_p \sum_f \sum_t \frac{t_{p,t} * y_{p,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,f})})$$

##### 4.1.5.4. Costo de conductor

$$C^{conductor} = CD * [\sum_p \sum_f \sum_t TV_{p,f} * \frac{t_{p,t} * y_{p,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,f})} + \sum_p \sum_n \sum_f \sum_t TV_{p,n,f,t} * \frac{t_{p,t} * z_{p,n,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,n,f,t})}]$$

$$+ \frac{CD}{Vel} * \sum_k \sum_n \sum_{n' \neq n} \sum_{t \geq 2} m_{k,n,t} * v_{k,n,n',t} * M_{n,n'}$$

#### 4.1.5.5. Costo de operación de plantas de densificación

$$C^{operación\ planta\ densificación} = OPD * \sum_p \sum_n \sum_f \sum_t u_n * t_{p,t} * z_{p,n,f,t} \\ + \sum_k \sum_p \sum_n \sum_d \sum_f \sum_t m_{k,n,t} * OPD'_d * d_d * t_{p,t} * z_{p,n,f,t}$$

#### 4.1.5.6. Costo de inversión de plantas de densificación

$$C^{inversión\ planta\ densificación} = IPD * |T| * (\sum_n u_n * PD_n) + IPDF * |T| * \sum_n u_n \\ + IPD'_d * \sum_k m_{act,k}$$

#### 4.1.5.7. Costo de movimiento de densificadoras móviles

$$C^{movimiento\ densificadora\ móvil} = C * \sum_k \sum_n \sum_{n' \neq n} \sum_{t \geq 2} m_{k,n,t} * v_{k,n,n',t} * M_{n,n'}$$

#### 4.1.5.8. Costo de operación de planta final

$$C^{operación\ planta\ final} = OPF * [\sum_p \sum_f \sum_t y_{p,f,t} * f_f + \sum_p \sum_n \sum_d \sum_f \sum_t t_{p,t} * (1 - P_d) * z_{p,n,f,t} * d_d * f_f]$$

#### 4.1.5.9. Costo de inversión de planta final

$$C^{inversión\ planta\ final} = IPF * |T| * \sum_f PF_f * f_f + IPF * |T| * \sum_f f_f$$

#### 4.1.5.10. Ingreso por venta de energía

$$POT = V * Ef * [\sum_p \sum_n \sum_f \sum_t \sum_d t_{p,t} * (1 - P_d) * z_{p,n,f,t} * d_d * F_{p,d} + \sum_p \sum_f \sum_t t_{p,t} * y_{p,f,t} * F_p \\ - \sum_p \sum_k \sum_n \sum_f \sum_t \sum_d t_{p,t} * z_{p,n,f,t} * d_d * (E_d * u_n + E'_d * m_{k,n,t})]$$

#### 4.1.6. Restricciones

El modelo matemático se completa mediante un conjunto de restricciones que garantizan la viabilidad operacional y física del sistema. A continuación se describen las restricciones implementadas.

1. La cantidad de biomasa utilizada de cada punto de generación  $p$  no puede exceder la disponibilidad máxima de residuo generada en dicho punto.

$$t_{p,t} \leq Q_{p,t} * (\sum_n \sum_f z_{p,n,f,t} + \sum_f y_{p,f,t}) \forall p \in P, \forall t \in T$$

2. Los residuos utilizados de un punto de generación  $p$  se densifican en una planta de densificación ubicada en  $n$ , o bien se dirigen directamente a una planta final ubicada en  $f$ .

$$\sum_n \sum_f z_{p,n,f,t} + \sum_f y_{p,f,t} \leq 1 \quad \forall p \in P, \forall t \in T, \text{ si } Q_{p,t} > 0$$

$$\sum_n \sum_f z_{p,n,f,t} + \sum_f y_{p,f,t} = 0 \quad \forall p \in P, \forall t \in T, \text{ si } Q_{p,t} = 0$$

3. Si el residuo se transporta directamente a la planta final, la distancia entre el punto de generación  $p$  y la planta final ubicada en  $f$  no puede exceder la distancia máxima permitida sin densificar.

$$DG_{p,f} * y_{p,f,t} \leq DM_p \quad \forall p \in P, \forall f \in F, \forall t \in T$$

4. Si el residuo se envía a una planta de densificación, la distancia entre el punto de generación  $p$  y la planta de densificación ubicada en  $n$  no puede exceder la distancia máxima permitida sin densificar.

$$DD_{p,n} * z_{p,n,f,t} \leq DM_p \quad \forall p \in P, \forall n \in N, \forall f \in F, \forall t \in T$$

5. Cada densificadora móvil  $k$  puede operar en una única ubicación  $n$  en cada período  $t$ .

$$\sum_n m_{k,n,t} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

6. Activación de variable que indica que se usó la densificadora móvil  $k$  en algún período  $t$ .

$$\sum_n \sum_t m_{k,n,t} \leq |N| * |T| * m_{act_k} \quad \forall k \in K$$

7. Cada ubicación  $n$  puede contener como máximo una planta de densificación en cada período  $t$ .

$$u_n + \sum_k m_{k,n,t} \leq 1 \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

8. Si cambia la ubicación  $n$  de la densificadora móvil  $k$  entre período  $t-1$  y  $t$  entonces se activa la variable de movimiento.

$$v_{k,n,n',t} \geq m_{k,n',t} + m_{k,n,t-1} - 1 \quad \forall k \in K, \forall n, n' \neq n \in N, \forall t \geq 2 \in T$$

9. Una densificadora móvil  $k$  solo puede moverse desde su ubicación actual  $n$ .

$$v_{k,n,n',t} \leq m_{k,n,t-1} \quad \forall k \in K, \forall n, n' \neq n \in N, \forall t \geq 2 \in T$$

10. Si una densificadora móvil  $k$  se mueve de la ubicación  $n$  a  $n'$  entre el período  $t-1$  y  $t$ , entonces se activa la densificadora móvil  $k$  en ubicación  $n'$  en periodo  $t$ .

$$v_{k,n,n',t} \leq m_{k,n',t} \quad \forall k \in K, \forall n, n' \neq n \in N, \forall t \in T$$

11. Balance de plantas de densificación móviles.

$$m_{k,n,t} = m_{k,n,t-1} + \sum_{n'} v_{k,n',n,t} - \sum_{n'} v_{k,n,n',t} \quad \forall k \in K, \forall n, n' \neq n \in N, \forall t \geq 2 \in T$$

12. Únicamente se puede instalar un método de densificación  $d$  en el sistema.

$$\sum_d d_d \leq 1$$

13. Se debe seleccionar método de densificación  $d$  a utilizar en el sistema únicamente si se activa alguna planta de densificación.

$$\sum_d d_d \leq u_n + \sum_k m_{act_k} \quad \forall t \in T, \forall n \in N$$

14. Activación de variable de capacidad de planta de densificación ubicada en  $n$ .

$$PD_n \geq \sum_p \sum_f t_{p,t} * z_{p,n,f,t} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

15. Las toneladas de residuo enviadas a una planta de densificación no pueden superar la capacidad máxima de la planta.

$$\sum_p \sum_f t_{p,t} * z_{p,n,f,t} \leq u_n * PD_n + \sum_d QD_d * D * d_d * \sum_k m_{k,n,t} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

16. Las plantas de densificación fijas deben procesar al menos un determinado % de su capacidad.

$$\sum_p \sum_f t_{p,t} * z_{p,n,f,t} \geq UD * PD_n * u_n \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

17. Las plantas de densificación móviles deben procesar al menos un determinado % de su capacidad.

$$\sum_p \sum_f t_{p,t} * z_{p,n,f,t} \geq UM * QD_d * d_d * D * \sum_k m_{k,n,t} \quad \forall n \in N, \forall d \in D, \forall t \in T$$

18. No es posible densificar los residuos provenientes de puntos de generación  $p$  - Cáscara de Arroz con el método de densificación *Triturado*.

$$z_{p,n,f,t} + d_{\text{triturado}} * (u_n + \sum_k m_{k,n,t}) \leq 1 \quad \forall p \in P^{CA}, \forall n \in N, \forall f \in F, \forall t \in T$$

19. Si el residuo se transporta desde una planta de densificación hacia la planta final, la distancia entre la planta de densificación ubicada en  $n$  y la planta final ubicada en  $f$  no puede exceder la distancia máxima permitida una vez densificado el residuo por el método de densificación  $d$ .

$$DF_{p,n} * z_{p,n,f,t} \leq \sum_d DMD_{p,d} * d_d \quad \forall p \in P, \forall n \in N, \forall f \in F, \forall t \in T$$

20. Si la planta de densificación ubicada en  $n$  está activada, debe recibir residuos desde al menos un punto de generación  $p$ . Recíprocamente, si la planta de densificación ubicada en  $n$  recibe residuos en el período  $t$ , entonces dicha planta de densificación debe estar activada.

$$\sum_p \sum_f z_{p,n,f,t} \geq u_{n,t} + \sum_k m_{k,n,t} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

$$\sum_p \sum_f z_{p,n,f,t} \leq |P| * |F| * (u_n + \sum_k m_{k,n,t}) \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

21. No se puede activar más de  $N$  plantas finales  $f$ .

$$\sum_f f_f \leq N$$

22. Activación de variable de capacidad de planta final ubicada en  $f$ .

$$PF_f \geq \sum_p \sum_n \sum_d t_{p,t} * (1 - P_d) * z_{p,n,f,t} * d_d + \sum_p t_{p,t} * y_{p,f,t} \quad \forall t \in T, \forall f \in F$$

23. Se debe respetar la demanda mínima de la planta final  $f$ .

$$\sum_p \sum_n \sum_d t_{p,t} * (1 - P_d) * z_{p,n,f,t} * d_d + \sum_p t_{p,t} * y_{p,f,t} \geq PF_f * UF * f_f \quad \forall f \in F, \forall t \in T$$

24. Si la planta final ubicada en  $f$  está activada, debe recibir residuos desde al menos una planta de densificación ubicada en  $n$  o punto de generación  $p$ . Recíprocamente, si alguna planta de densificación ubicada en  $n$  o punto de generación  $p$  envía producto a la planta final ubicada en  $f$ , entonces dicha planta final debe estar activada.

$$\sum_p \sum_n z_{p,n,f,t} + \sum_p y_{p,f,t} \geq f_f \quad \forall f \in F, \forall t \in T$$

$$\sum_p \sum_n z_{p,n,f,t} + \sum_p y_{p,f,t} \leq |P| * f_f \quad \forall f \in F, \forall t \in T$$

25. No es posible densificar los residuos provenientes de puntos de generación  $p$  - *Frigorífico*.

$$\sum_n \sum_f z_{p,n,f,t} = 0 \quad \forall p \in P^{FR}, \forall t \in T$$

26. Activación de variable de flota total de camiones.

$$NTC \geq \frac{t_{p,t} * y_{p,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,f})} + \frac{t_{p,t} * z_{p,n,f,t}}{C_p * (D * VD_{p,n,f,t})}$$

27. Variables no negativas.

$$t_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$z_{p,n,f,t} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, \forall n \in N, \forall f \in F, \forall t \in T$$

$$m_{k,n,t} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall n \in N, \forall t \in T$$

$$u_n \in \{0, 1\} \quad \forall n \in N$$

$$d_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D$$

$$f_f \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F$$

$$y_{p,f,t} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, \forall f \in F, \forall t \in T$$

$$PD_n \geq 0 \quad \forall n \in N$$

$$PF_f \geq 0 \quad \forall f \in F$$

$$m_{act}_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K$$

$$v_{k,n,n',t} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall n, n' \neq n \in N, \forall t \geq 2 \in T$$

La Figura 4.1 presenta un esquema conceptual de la red logística modelada, ilustrando los tres niveles que la componen, los puntos de generación de biomasa, las plantas de densificación intermedias tanto fijas como móviles, incluyendo la posibilidad de reubicación de estas últimas entre períodos y la planta final de valorización energética. Sobre cada componente se indican las principales variables de ubicación y flujo de biomasa consideradas en el modelo.

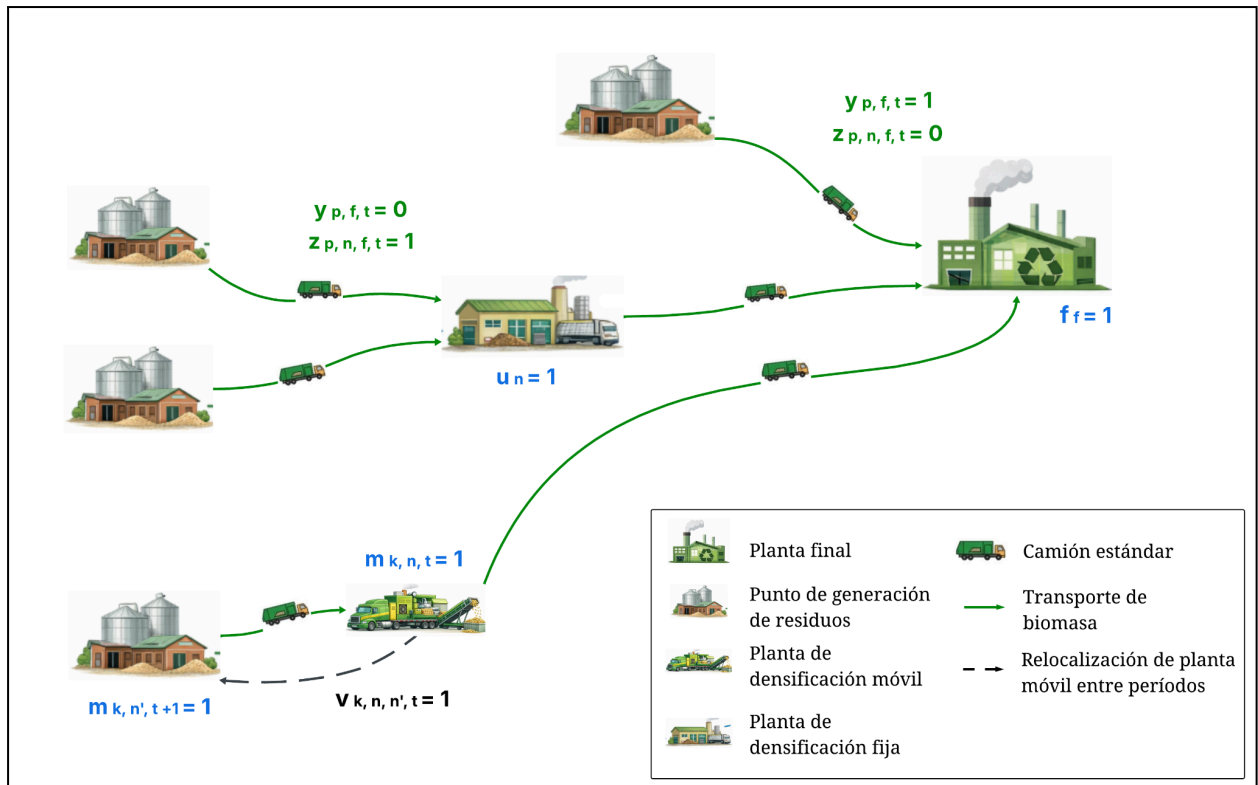


Figura 4.1. Esquema conceptual del modelo.

Fuente: Elaboración propia asistida con IA para la elaboración de dibujos representativos.

## 4.2. Relevamiento y generación de datos

La mayoría de los parámetros utilizados en el modelo fueron obtenidos de artículos académicos, informes técnicos y sitios web especializados. Sus valores numéricos y principales fuentes se presentan en el [Anexo V](#). Aquellos parámetros que requirieron un desarrollo de cálculo adicional, o cuya determinación amerita una explicación más extensa, se documentan en el [Anexo VI](#).

## 4.3. Implementación computacional

El modelo fue implementado en Python 3.13 utilizando el framework de modelado algebraico Pyomo, con HiGHS como solucionador (solver) de optimización lineal. La configuración de software y hardware sobre la que se ejecutaron las pruebas fue Windows 11 Home, procesador Intel Core i7-1165G7 @ 2.80 GHz, 32 GB RAM, sistema operativo de 64 bits.

Al momento de implementar el modelo matemático, fue necesario realizar modificaciones respecto a la formulación original, con el objetivo de mejorar el desempeño computacional y reducir los tiempos de resolución.

En primer lugar, se linealizó el modelo mediante el uso de las restricciones o envolventes de McCormick, utilizadas en programación entera mixta para reformular expresiones no lineales. La técnica consiste en reemplazar cada producto entre variables por una nueva variable auxiliar, acompañada de un conjunto de restricciones lineales que garantizan que la nueva variable tenga el mismo comportamiento que el producto reemplazado dentro de un dominio definido. (McCormick, 1976). Se presenta el detalle de esta modificación en el [Anexo VII](#).

Adicionalmente, se decidió eliminar la variable  $t_{p,t}$ , cuya función original era permitir que el modelo asignara una cantidad de biomasa entre cero y la disponibilidad máxima. Sin embargo, se observó que la solución óptima tendía a utilizar la totalidad de la biomasa disponible  $Q_{p,t}$ . En consecuencia, la variable resultaba redundante y su eliminación permitió reducir el número de variables, restricciones y linealizaciones innecesarias, simplificando el modelo.

En la versión inicial del código, las distancias entre los puntos de generación y los nodos candidatos se calculaban proyectando cada punto sobre la red vial mediante OSMnx y recorriendo la red mediante el algoritmo de Dijkstra, utilizado para hallar el camino más corto entre nodos de un grafo (Dijkstra, 1959; Zhan & Noon, 1998). Sin embargo, este procedimiento generó inconsistencias debido a la forma en que OSMnx proyecta las coordenadas: a cada punto de generación se le asigna el nodo de la red vial más cercano, por lo que cuando dos generadores resultaban próximos al mismo nodo, ambos quedaban representados por la misma coordenada de red. A partir de allí, el algoritmo los trataba como si estuvieran en la misma ubicación, asignándoles distancias idénticas a todos los demás puntos del grafo. Para resolver esto, se optó por calcular las distancias directamente a partir de las coordenadas GPS de cada punto mediante la fórmula de Haversine, empleada para estimar la distancia sobre la superficie terrestre entre dos ubicaciones definidas por su latitud y longitud (Sinnott, 1984). Posteriormente, esas distancias se corrigieron mediante un factor de 1,3 para aproximar el recorrido efectivo por carretera. Este valor se adoptó como supuesto de modelado, en línea con el uso de estos factores reportados por Ballou et al. (2002). En consecuencia, los nodos candidatos a planta de densificación continúan siendo nodos de la red vial, pero las distancias del modelo se calculan en línea recta corregida, no por ruta.

Finalmente, con el propósito de reducir aún más los tiempos de resolución, se decidió fijar la tecnología de densificación  $d$  en cada corrida del modelo, ejecutando tres instancias independientes, una por cada alternativa tecnológica considerada. En cada instancia, el modelo conserva la capacidad de decidir si la estrategia óptima consiste en densificar los residuos o enviarlos directamente a la planta final de termovalorización, aunque restringiendo dicha decisión a una única tecnología disponible. Posteriormente, los resultados de las tres instancias fueron comparados para identificar la alternativa tecnológica más conveniente.

#### **4.4. Validación del modelo**

Con el objetivo de verificar la validez del modelo propuesto, se diseña una secuencia estructurada de casos de prueba.

En una primera etapa se realizan pruebas unitarias por restricción, considerando casos límite en los que cada una de ellas debía activarse. Estas pruebas se ejecutan con un número reducido de puntos de generación, ubicaciones candidatas para plantas de densificación, ubicaciones candidatas para plantas finales y períodos de planificación, con el fin de reducir el tiempo de resolución.

Una vez verificado el correcto funcionamiento individual de las restricciones, se desarrollan casos piloto integrales para evaluar la coherencia global de la lógica del modelo. En escenarios de pequeña escala se comprobó que el comportamiento obtenido fuera consistente con lo esperado desde el punto de vista logístico y económico. En particular, se verificó que el modelo identifica correctamente cuándo conviene densificar en función de la distancia al punto de generación y el costo de densificación; que selecciona adecuadamente entre planta fija y móvil según el volumen de generación y la inversión requerida; que elige el método de densificación correcto según la relación entre densidad del producto y costo operativo; y que resuelve correctamente la ubicación de plantas móviles en escenarios con múltiples períodos y reubicaciones. Asimismo, se evaluó el desempeño del modelo en escenarios más complejos, que combinan múltiples puntos de generación, mayores distancias, diversas posibles ubicaciones de planta final y distintos requerimientos de densificación entre los puntos de generación.

Finalmente, se incrementó progresivamente la dimensión del modelo hasta alcanzar el tamaño completo del caso de estudio. Durante este proceso de validación se identificaron errores y oportunidades de mejora que dieron lugar a sucesivas versiones del modelo, hasta verificar que la formulación reproduce el comportamiento esperado.

## 5. Análisis de Resultados

### 5.1. Análisis de la solución obtenida

El modelo fue ejecutado considerando un horizonte de planificación de 12 meses, 22 puntos de generación de biomasa, 5 ubicaciones candidatas para plantas finales de valorización, 16 nodos candidatos para ubicar plantas de densificación fijas o móviles y hasta 4 equipos de plantas móviles de densificación. El solver HiGHS obtuvo una solución óptima con un gap del 0,0% en 385,7 minutos con 99.477 variables y 109.962 restricciones.

Cabe aclarar que el modelo admite el agregado de una mayor cantidad de elementos en cada uno de los conjuntos. La cantidad de nodos candidatos para ubicación de plantas de densificación, así como la cantidad de equipos de plantas móviles, es específica de este caso de estudio y fue definida considerando su alta incidencia en los tiempos de cómputo. De igual forma, los puntos de generación de biomasa y las ubicaciones candidatas para plantas de finales de valorización, son modificables en función del caso que se busque estudiar.

#### 5.1.1. Solución obtenida

Una vez evaluado el modelo para las distintas tecnologías de densificación, el briquetado constituye la configuración óptima del sistema. El valor de la función objetivo es de  $-\text{USD } 1.596.662$ , lo que indica que los ingresos por venta de energía superan los costos totales de la cadena de suministro en el horizonte de un año. La Tabla 5.1 presenta las principales métricas de la solución óptima, expresadas para dicho horizonte.

Tabla 5.1. Métricas principales de la solución óptima (horizonte anual)

Métrica	Valor
Función Objetivo ( <i>costo - ganancia</i> )	$-\text{USD } 1.596.662$
Biomasa procesada	200.160 ton
Energía generada	276.954 MWh
Costo total	$\text{USD } 20.005.783$
Ingreso por venta de energía	$\text{USD } 21.602.445$
Costo por MWh generado	$\text{USD } 72,23$
Margen neto por MWh	$\text{USD } 5,77$

La solución obtenida incorpora una planta de densificación fija de briquetado y ubica la planta de valorización energética en el límite entre los departamentos de Tacuarembó y Rivera. El flujo total de biomasa procesada es de 200.160 toneladas anuales, de las cuales 113.520 toneladas son enviadas a la planta de densificación antes de transportarse hacia la planta final, mientras que las 86.640 toneladas restantes se envían de forma directa desde los puntos de generación hacia dicha instalación. La Figura 5.1 ilustra la localización de las plantas seleccionadas y los puntos de generación utilizados en el horizonte de planificación, mientras que la Figura 5.2 muestra los flujos de transporte asociados a dicha configuración.

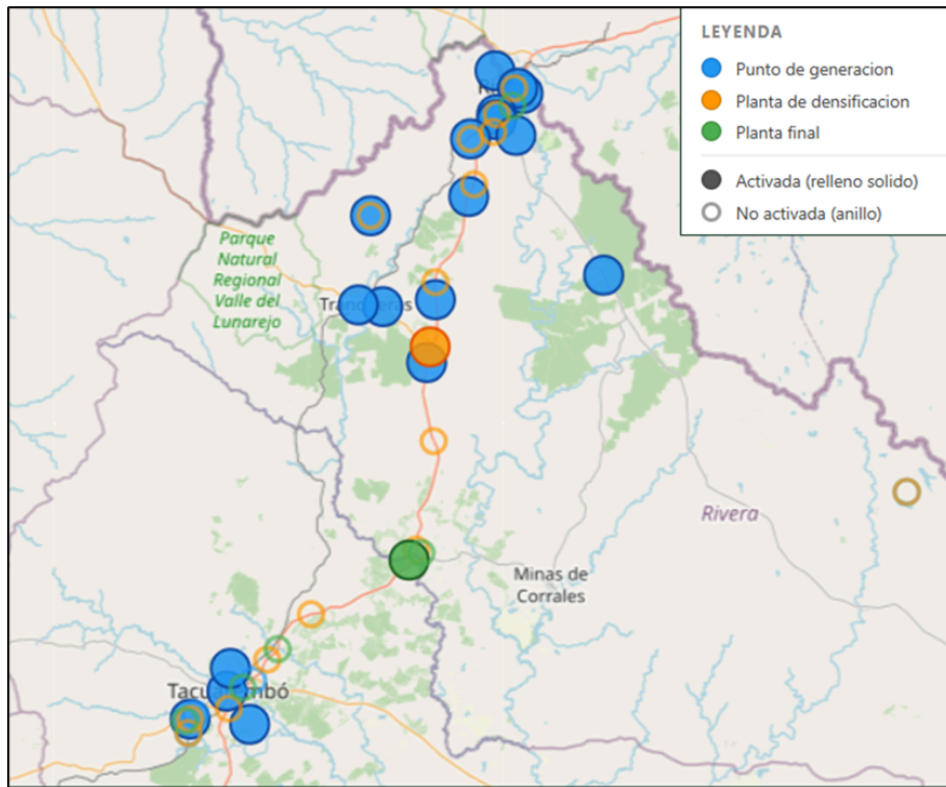


Figura 5.1. Localización de las plantas seleccionadas y puntos de generación activos.  
Fuente: Elaboración propia.

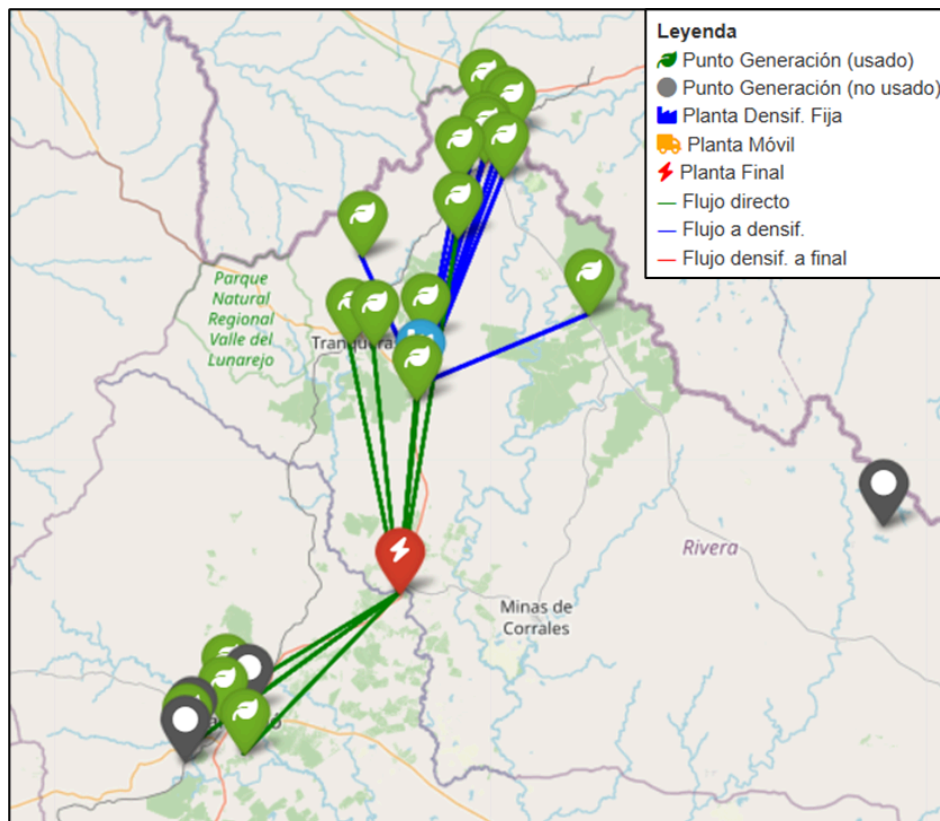


Figura 5.2. Flujos de transporte de biomasa.  
Fuente: Elaboración propia.

En términos energéticos, el sistema genera 276.954 MWh anuales, volumen suficiente para abastecer el consumo eléctrico anual de aproximadamente 101.000 hogares uruguayos, o equivalentemente, de una ciudad de unos 86.000 habitantes, comparable en escala a Salto o Paysandú. El costo de generación resultante es de USD 72,23/MWh y, considerando un precio de referencia de venta de energía de USD 78/MWh, se obtiene un margen neto de USD 5,77/MWh. Si bien el proyecto resulta rentable con una ganancia neta de USD 1.596.662 en un año, el margen operativo relativamente acotado sugiere que la viabilidad económica del proyecto es sensible a variaciones en los parámetros de entrada, aspecto que se analiza en detalle en la Sección 5.2.

### 5.1.2. Planta final de valorización energética

La planta de valorización energética se ubica en las coordenadas (-31,536°, -55,694°) en el departamento de Tacuarembó, con una capacidad instalada de 16.207 ton/mes, alcanzando una utilización del 100%. En términos geográficos, dista aproximadamente 38 km del aserradero Frutifor/Arboreal, el punto de generación con mayor biomasa disponible.

### 5.1.3. Planta de densificación

La planta de densificación fija de briquetado se localiza sobre la Ruta N°5 a la altura de la ciudad de Tranqueras (-31,183°, -55,755°), en el departamento de Rivera, con una capacidad de 9.460 ton/mes y un nivel de utilización del 100%. La planta actúa como nodo logístico intermedio para nueve aserraderos que se encuentran demasiado alejados de la planta final como para ser abastecidos mediante transporte directo, pero sí están dentro del radio de alcance de la planta de densificación. Sin esta estructura, estos nueve generadores de biomasa, que aportan en conjunto 113.520 ton/año, quedarían fuera del sistema en la configuración óptima obtenida. Además, al mejorar el aprovechamiento energético de la biomasa mediante densificación, se capturan ganancias anuales asociadas tanto a la incorporación de biomasa adicional como a su mayor eficiencia energética.

### 5.1.4. Puntos de generación seleccionados

El modelo selecciona dieciocho de los veintidós puntos de generación disponibles, todos aserraderos, que en conjunto aportan 200.160 ton/año. De estos, nueve envían biomasa directamente a la planta final de valorización energética, los nueve restantes la envían a través de la planta de densificación. La Tabla 5.2 presenta los principales flujos de biomasa por punto de generación, pudiendo observar que la oferta se encuentra fuertemente concentrada: Frutifor/Arboreal, Urufor y Dank S.A. representan en conjunto el 80,7% del total procesado.

Tabla 5.2. Flujos de biomasa por punto de generación.

Punto de generación	Flujo anual (ton)	% del total	Ruta
Frutifor/Arboreal	69.168	34,6%	Directa
Urufor	58.524	29,2%	Densificación
Dank S.A.	33.852	16,9%	Densificación
Imnsur	15.960	8,0%	Densificación
JCE	8.748	4,4%	Directa
Restantes (10)	9.540	6,9%	Directa / Densificación
Total	200.160	100%	

### 5.1.5. Puntos de generación no seleccionados

Los cuatro puntos de generación no seleccionados corresponden a dos frigoríficos y dos molinos de arroz. La decisión del modelo de excluirlos se debe a dos factores principales.

En primer lugar, tanto la cáscara de arroz como el contenido ruminal presentan un menor rendimiento energético por tonelada en comparación con los residuos de aserradero. En el caso de la cáscara de arroz, su poder calorífico es de aproximadamente 14 MJ/kg, mientras que los residuos de aserradero se sitúan entre 18 y 19 MJ/kg en base seca. Dado que en este trabajo se asume un costo de adquisición de biomasa uniforme para todos los residuos, esta menor generación de energía se traduce en menores ingresos por tonelada procesada e incluso resulta insuficiente para compensar los costos asociados.

En segundo lugar, los residuos de frigorífico no pueden ser densificados, por lo que únicamente pueden transportarse de forma directa a la planta final. Sin embargo, las distancias superan el límite permitido para este tipo de transporte, lo que impide su incorporación al sistema.

### 5.1.6. Estructura de costos

El costo total del proyecto en el horizonte de planificación de un año es de USD 20.005.783. y, en función de la energía generada, equivale a un costo de aproximadamente USD 72/MWh. La Figura 5.3 presenta la distribución porcentual de cada componente sobre el costo total, mientras que el detalle numérico se incluye en el [Anexo VIII](#). Se presentan en conjunto costos de inversión y operación ya que su separación no modifica de manera significativa la distribución.

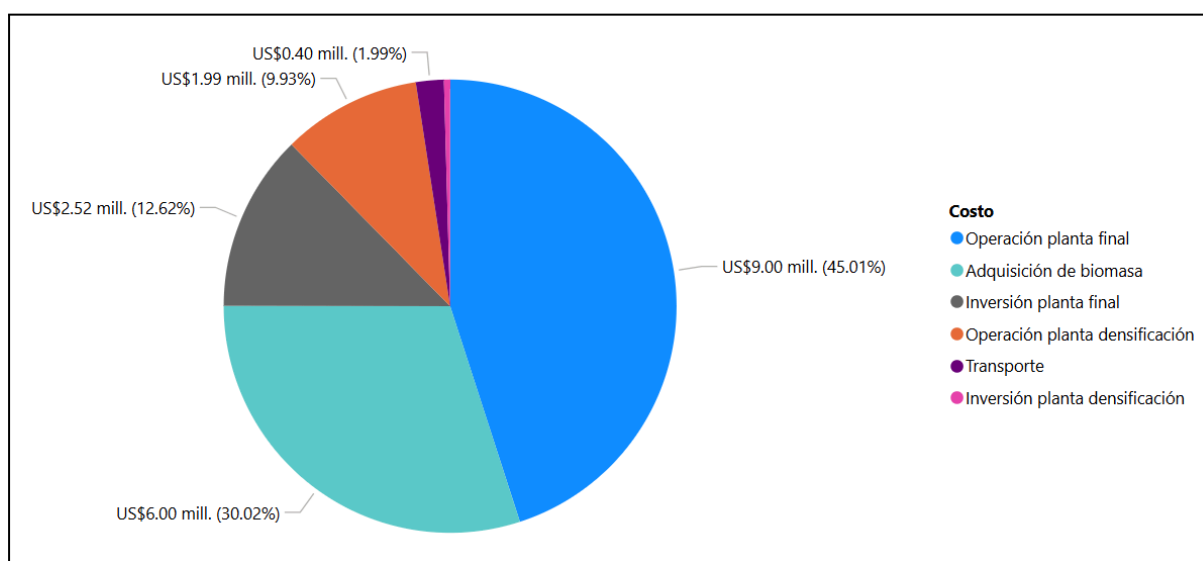


Figura 5.3. Distribución porcentual de costos (horizonte anual).

Fuente: Elaboración propia.

La estructura de costos muestra que el sistema está dominado por los costos asociados a la operación de la planta final de valorización energética. En particular, la operación de dicha planta representa aproximadamente USD 9 millones (45% del total), a lo que se le suma la inversión, consolidando a esta instalación como el principal costo del proyecto. En segundo lugar se ubica el costo de adquisición de biomasa, que representa el 30% del total. Por su parte, la operación y la inversión de la planta de densificación representan fracciones menores, alcanzando en conjunto aproximadamente el 11% del costo total. Finalmente, el costo de transporte apenas alcanza el 2%, incluyendo la adquisición de la flota, su mantenimiento, el consumo de combustible y los salarios de los transportistas.

La sensibilidad y el análisis de estos resultados se desarrollan en mayor detalle en la Sección 5.2.

### 5.1.7. Flota de transporte

Se requieren dos camiones para operar la red, con un total de 4.633 viajes anuales, equivalente a 193 viajes mensuales por camión y aproximadamente 7 viajes diarios, considerando distintos turnos de transportistas sobre un mismo camión. Cabe destacar que operar con una flota de esta magnitud implica una vulnerabilidad ante fallas mecánicas o imprevistos logísticos, aspecto que excede el alcance del modelo pero que debería considerarse en una etapa de diseño operativo posterior. Dado el bajo peso del transporte en los costos totales, podría evaluarse la incorporación de un camión de respaldo.

### 5.1.8. Análisis comparativo entre tecnologías de densificación

Con el objetivo de evaluar la influencia de la tecnología de densificación sobre la configuración del sistema y los resultados económicos, se analizan los escenarios alternativos considerando peletizado y triturado, identificando los elementos que explican las diferencias respecto a la solución óptima.

En línea con la solución óptima, los resultados globales evidencian un mejor desempeño del briquetado frente a las alternativas de peletizado y triturado. El modelo alcanza una función objetivo de -USD 1.596.662, frente a -USD 961.649 en ambos escenarios alternativos, lo que representa una mejora de USD 635.013, equivalente a un incremento del 66,0% en rentabilidad. La Tabla 5.3 presenta las principales métricas de la solución óptima en comparación con las tecnologías alternativas, expresadas en un horizonte anual.

Tabla 5.3. Comparación de métricas principales entre tecnologías de densificación (horizonte anual).

Métrica	Briquetado	Peletizado / Triturado
Función Objetivo ( <i>costo - ganancia</i> )	-USD 1.596.662	-USD 961.649
Biomasa procesada	200.160 ton	126.624 ton
Energía generada	276.954 MWh	162.595 MWh
Costo total	USD 20.005.783	USD 11.720.788
Ingreso por venta de energía	USD 21.602.445	USD 12.682.437
Costo por MWh generado	USD 72,23	USD 72,09
Margen neto por MWh	USD 5,77	USD 5,91

La diferencia entre tecnologías se debe a distintos factores. En primer lugar, la fracción de biomasa proveniente de aserraderos que puede ser densificada: mientras que en el briquetado y el peletizado el 100% de la biomasa puede densificarse, en el caso del triturado esta proporción se reduce al 40%. Esta limitación restringe el aprovechamiento energético del recurso, elevando el costo por tonelada a niveles que vuelven inviable esta alternativa.

El segundo elemento relevante es el potencial energético que adquiere la biomasa luego de la densificación, representado por el factor de conversión energética (Fpd). Si bien en ninguna de las tecnologías evaluadas el ingreso generado por la venta de esta energía resulta suficiente para compensar por sí solo el costo del proceso de densificación, el briquetado presenta el menor déficit unitario al contar con el mayor Fpd entre las alternativas.

Estas diferencias se traducen en configuraciones logísticas distintas para cada tecnología. En el caso del briquetado, la posibilidad de instalar una planta de densificación intermedia permite extender el alcance territorial de la red y capturar una mayor cantidad de puntos de generación de biomasa, incluyendo en simultáneo a los principales aserraderos del sistema, Frutifor/Arboreal y Urufor. En cambio, los escenarios de peletizado y triturado operan sin planta de densificación intermedia, limitando la red a los puntos de generación más cercanos a la planta final, ubicada en Rivera.

Para confirmar que la apertura de la planta de densificación está económicamente justificada, se analiza el escenario de briquetado considerando los costos de operación del proceso de densificación y las ganancias asociadas al aumento del potencial energético por densificación, así como la incorporación de nuevos puntos de generación. En este escenario, la planta de densificación procesa 113.520 toneladas anuales a un costo total de USD 2.074.351 incluyendo operación e inversión. Al densificarse, estas toneladas alcanzan un factor de conversión energética de 5,495 MWh/ton, frente a 4,586 MWh/ton si se enviaran directamente a la planta final. Considerando la eficiencia de la planta final (28%), el precio de venta de energía (USD 78/MWh), las pérdidas de biomasa en el proceso de densificación (5%) y el consumo energético de la planta de densificación (0,002 MWh/ton), el proceso de densificación genera una ganancia incremental anual de USD 1.567.523, según se detalla en la ecuación (1).

$$113.520 \times (5,495 \times 0.95 - 0,002 - 4,586) \times 0,28 \times 78 = USD 1.567.523 (1)$$

Aunque este ingreso adicional no cubre el costo operativo de la planta de densificación, su apertura se justifica por su impacto en el sistema, ya que permite capturar ganancias de USD 1.606.026 anuales asociadas a la incorporación de biomasa proveniente de aserraderos que de otra forma no podría aprovecharse dentro de la configuración óptima.

Aunque el margen de ganancia es relativamente estrecho, confirma que la apertura de la planta de densificación es económicamente justificable, aunque su rentabilidad es sensible a variaciones en el costo operativo y en el factor de conversión energética.

El resultado neto se resume en la Tabla 5.4.

*Tabla 5.4. Ganancia neta anual por apertura de planta de densificación.*

Concepto	Monto (USD)
Ganancia incremental por densificación de biomasa	+1.567.523
Ganancia por incorporación de nuevos puntos de generación	+1.606.026
Costo de la planta de densificación	-2.074.351
Resultado neto	+1.099.198

## 5.2. Análisis de sensibilidad

Los resultados del escenario base revelan que la viabilidad económica del proyecto es sensible a determinados parámetros y a modificaciones en la estructura de la red, por lo que resulta relevante analizar en qué medida estas variaciones pueden modificar las decisiones del modelo y el valor de la función objetivo. Este enfoque permite evaluar la robustez de la solución obtenida e identificar los

factores que tienen mayor influencia sobre la rentabilidad y la configuración óptima de la cadena de suministro.

### 5.2.1. Análisis de sensibilidad 1 - Variación de parámetros

En primer lugar, se analiza la sensibilidad del modelo frente a variaciones en determinados parámetros. Para ello, se modifican individualmente aquellos parámetros con incertidumbre, en un rango comprendido entre -30 % y +30 % respecto a su valor base. Los resultados se expresan en términos de la función objetivo (*costo - ganancia*), donde valores más negativos indican mayor rentabilidad.

Si bien el escenario base identifica al briquetado como la tecnología óptima, se evalúan todas las tecnologías de densificación con el fin de analizar si cambios en alguno de los parámetros podrían alterar esta elección. Los resultados detallados para cada tecnología se presentan en el [Anexo IX](#).

La Figura 5.4 muestra la variación de la función objetivo ante cambios porcentuales en cada parámetro evaluado, considerando el escenario óptimo que utiliza la tecnología de briquetado, cuyo valor base es de -USD 1.596.662.

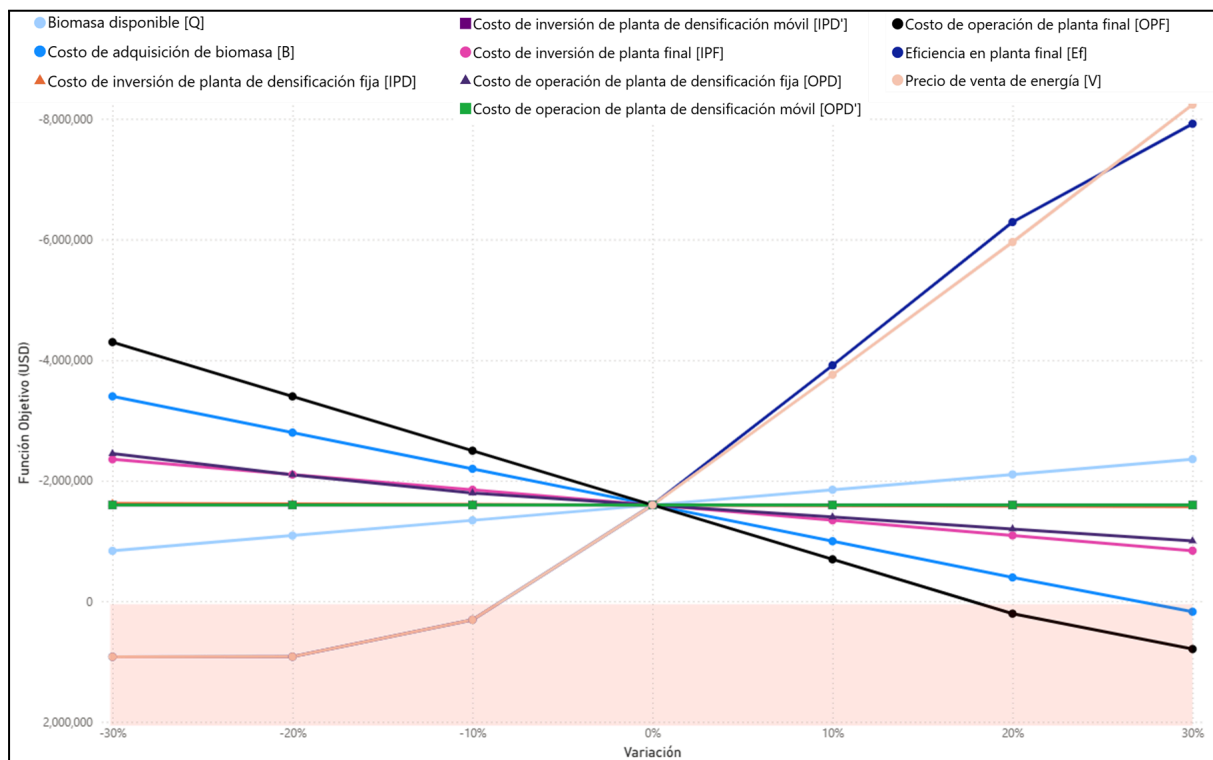


Figura 5.4. Análisis de sensibilidad de solución óptima frente a variaciones en parámetros.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen e interpretan los resultados para cada parámetro evaluado para la tecnología de briquetado, incorporando comparaciones con peletizado y triturado cuando se considera pertinente.

#### 5.2.1.1. Precio de venta de energía (V) y eficiencia de conversión en planta de valorización energética (Ef)

Estos parámetros constituyen los factores de mayor impacto sobre la viabilidad económica del proyecto. Su comportamiento es prácticamente idéntico, lo que es esperable dado que en la función objetivo intervienen como el producto  $V \times Ef$ , produciendo el mismo efecto sobre el resultado.

El hallazgo más relevante es que una reducción del 10% en cualquiera de estos parámetros provoca que el sistema deje de ser rentable; mediante interpolación entre resultados se estima que esto ocurre ante una reducción aproximada de 8,4%. En sentido contrario, el proyecto se beneficia de incrementos en estos parámetros: un aumento del 30 % eleva la función objetivo a -USD 8.234.977, lo que representa un aumento aproximado del 500%. Cabe destacar que variaciones superiores al 20-30% en la eficiencia de conversión de una planta térmica no son realistas en la práctica, por lo que dicho rango representa el límite del análisis.

Este resultado tiene además una lectura relevante, si se considerara una planta de valorización energética con una eficiencia de conversión del 36% (valor alcanzable por tecnologías termoquímicas avanzadas) manteniendo los mismos costos de inversión y operación, el proyecto resultaría rentable. Esto permitiría considerar tecnologías avanzadas como palanca para mejorar la viabilidad del sistema.

En términos de comparación entre distintas tecnologías de densificación, cuando estos parámetros disminuyen un 5% el modelo deja de activar la planta de densificación, por lo que las tres tecnologías convergen hacia una misma configuración de red y los resultados económicos resultan equivalentes.

#### **5.2.1.2. Disponibilidad de biomasa (Q)**

La disponibilidad de biomasa presenta una relación lineal con la función objetivo, lo que indica que el modelo utiliza toda la biomasa disponible que resulta económicamente rentable.

La pendiente de esta relación es significativamente mayor en el escenario de briquetado, alcanzando aproximadamente USD 253.554 por cada variación del 10% en la disponibilidad de biomasa, frente a USD 187.903 en los escenarios de peletizado y triturado. Este resultado muestra que el escenario óptimo captura un mayor ingreso por tonelada adicional de biomasa, debido a la diferencia en el potencial energético generado por el proceso de densificación.

#### **5.2.1.3. Costo de adquisición de biomasa (B)**

Este parámetro presenta una sensibilidad moderada. Las tres tecnologías se vuelven no rentables ante incrementos del orden del 25–27% en el costo de adquisición de biomasa. La convergencia de los valores de la función objetivo para las tres tecnologías en el escenario +30% confirma que, ante costos muy elevados en la etapa primaria del proceso, el modelo selecciona una estructura mínima común: sin plantas de densificación y seleccionando el menor número de puntos de generación económicamente viables.

#### **5.2.1.4. Costos de operación e inversión planta de valorización energética (OPF, IPF)**

El análisis del costo de operación de la planta final (OPF) resulta de gran importancia debido al peso significativo que tiene en la estructura de costos del proyecto. Este parámetro constituye el segundo de mayor influencia sobre los resultados del modelo. Un incremento del 20 % provoca que el proyecto deje de ser rentable, mediante interpolación entre los resultados se estima que esto ocurre ante un incremento aproximado de 16–18% respecto al valor base. En sentido inverso, las reducciones en este costo generan mejoras en la rentabilidad cercanas al 300 %.

Al igual que en el caso del costo de adquisición de biomasa, incrementos de +20 % y +30 % convergen hacia una misma estructura mínima, caracterizada por la ausencia de plantas de densificación y un número reducido de puntos de generación.

Este mismo comportamiento se observa en las variaciones del costo de inversión de la planta final (IPF), aunque con menor sensibilidad, lo que muestra que son los costos de operación, y no los de capital, los que determinan en mayor medida la viabilidad del proyecto. Cabe destacar que el impacto de IPF varía según la vida útil de la planta: a mayor vida útil, menor es el costo anual equivalente y, por ende, menor su incidencia en los resultados del modelo. En este sentido, se realiza un análisis adicional considerando una vida útil de 30 años (50% superior al valor base), obteniendo una función objetivo de -USD 2.453.633, lo que representa una mejora del 54% respecto al escenario base. A modo de referencia, la Central Termoeléctrica José Batlle y Ordóñez lleva operando 94 años (UTE, 2024), lo que evidencia que este tipo de infraestructura puede alcanzar vidas útiles superiores; si la planta del presente proyecto operara durante 100 años, la ganancia anual ascendería a USD 3.653.393, representando una mejora del 129% respecto al escenario base.

#### **5.2.1.5. Costos de operación e inversión planta de densificación fija (OPD, IPD)**

El comportamiento de estos parámetros revela las diferencias entre tecnologías. En el escenario de briquetado el costo de operación (OPD) presenta una respuesta aproximadamente lineal en todo el rango analizado, con valores de función objetivo entre -USD 2.448.956 (-30%) y -USD 1.000.682 (+30%). La planta de densificación se mantiene activa en todo el rango, lo que confirma que la decisión de densificar es económicamente relevante en este escenario. En contraste, el costo de inversión (IPD) muestra una sensibilidad menor, con una variación total de apenas USD 52.650 en todo el rango analizado. Este resultado indica que el modelo es más sensible a los costos operativos de la planta densificadora que a su inversión.

En los escenarios de peletizado y triturado, el modelo comienza a activar la planta de densificación únicamente cuando el costo de operación desciende lo suficiente. Por su parte, el costo de inversión no produce modificaciones en la solución en ninguno de estos escenarios, lo que confirma la baja sensibilidad del modelo frente a este parámetro.

#### **5.2.1.6. Costos de operación e inversión planta de densificación móvil (OPD', IPD')**

Se evalúan los parámetros asociados a las plantas de densificación móvil con el fin de determinar si variaciones dentro del rango evaluado podrían justificar la activación de estos equipos. Los resultados muestran que los costos de operación e inversión de las plantas móviles no generan cambios en la función objetivo, lo que confirma que las variaciones analizadas no son suficientes para justificar su uso. Este resultado será analizado con mayor profundidad en secciones posteriores.

#### **5.2.1.7. Síntesis de análisis de sensibilidad 1 - Variación de parámetros**

El análisis realizado indica que la principal vulnerabilidad del proyecto es la caída en el precio de venta de energía o en la eficiencia de conversión en la planta de valorización energética, con un margen de tolerancia de apenas el 8% respecto al valor base. La Tabla 5.5 resume los umbrales de inviabilidad identificados para los parámetros más críticos.

Desde el punto de vista tecnológico se observa que, en algunos casos, el modelo genera una estructura común para las tres tecnologías sin apertura de plantas de densificación, o bien activa plantas de densificación en los escenarios de peletizado y triturado, tecnologías que en el escenario base operan sin densificación. Sin embargo, en ningún caso estas alternativas superan el desempeño del briquetado, lo que refuerza la robustez de esta tecnología como solución óptima frente a distintas condiciones y variaciones en los parámetros.

Tabla 5.5. Umbrales de inviabilidad del modelo según parámetros críticos.

Parámetro	Descripción	Umbral de inviabilidad
V	Precio de venta de energía	Reducción del ~8%
Ef	Eficiencia energética en planta de valorización energética	Reducción del ~8%
OPF	Costo de operación de planta de valorización energética	Incremento del ~17%
B	Costo de adquisición de biomasa	Incremento del ~26%

### 5.2.2. Análisis de sensibilidad 2 - Evaluación planta final de valorización energética con tecnología de cogeneración

Se analiza el escenario de que la planta final de valorización opere bajo tecnología de cogeneración, aprovechando la generación eléctrica y el calor residual del proceso. En una planta de cogeneración a biomasa, la eficiencia eléctrica suele situarse entre 25-28%, mientras que la recuperación térmica puede aportar entre un 45-55% adicionales, alcanzando una eficiencia global del orden de 70-80% (Sustainable Energy Authority of Ireland, 2020). Sin embargo, para que el uso de energía térmica sea viable, la planta debería ubicarse cerca de industrias con demanda de calor, lo cual no ocurre en la ubicación de la solución óptima.

Aun así, el análisis de sensibilidad sobre la eficiencia permite cuantificar el impacto potencial de operar bajo cogeneración. Partiendo del escenario base con una eficiencia del 28 % y una ganancia de USD 1.596.662, los resultados del análisis de sensibilidad presentado en la Sección 5.2.1 muestran que un aumento del 10 % eleva la ganancia a USD 3.913.107 (+146 %), mientras que incrementos del 20 % y 30 % generan mejoras del 294 % y 396 %, respectivamente. Si la planta operara bajo cogeneración con una eficiencia global del orden del 70–80%, la mejora en la función objetivo reforzaría la viabilidad económica del proyecto, confirmando el potencial de integrar generación eléctrica y aprovechamiento térmico en plantas de biomasa a escala industrial, consistente con las tendencias internacionales del sector.

### 5.2.3. Análisis de sensibilidad 3 - Variación Factor de Conversión Energético (Fpd)

Tal y como se mencionó anteriormente, la ventaja competitiva del briquetado sobre las demás tecnologías se explica en parte por el aumento del poder calorífico de la biomasa luego de dicho proceso de densificación, lo que se refleja en el parámetro de conversión energética (Fpd). Debido a la relevancia de este parámetro en los resultados del modelo y a su nivel de incertidumbre, resulta necesario realizar el presente análisis.

Al reducir el valor de Fpd de la tecnología de briquetado en un 5%, el modelo abandona la estrategia de densificación y decide transportar la totalidad de la biomasa directamente hacia la planta final de valorización energética. Este resultado tiene un significado importante para la robustez de la solución obtenida, ya que evidencia que la decisión de invertir en una planta de densificación depende críticamente de la capacidad del briquetado para incrementar el poder calorífico de la biomasa.

A su vez, este análisis invita a reflexionar sobre la restricción (12) del modelo matemático, que impone la instalación de un único método de densificación para todas las fuentes de biomasa, sin permitir la asignación de tecnologías diferenciadas por residuo. En este sentido, cabe señalar que la única biomasa capaz de ser densificada mediante triturado son en parte los residuos de aserradero, y

dicha tecnología ya demostró no ser competitiva debido a la baja fracción densificable del volumen total. Respecto al peletizado y briquetado, este último mantiene su superioridad en términos del factor de conversión energética (Fpd) para todos los residuos considerados. Por tanto, se estima que aún si el modelo permitiera seleccionar distintos métodos de densificación según el tipo de residuo, la solución obtenida no se vería alterada.

#### **5.2.4. Análisis de sensibilidad 4 - Obligación a utilizar la biomasa disponible de todos los puntos de generación**

Este escenario no pudo alcanzar una solución óptima: luego de 18 horas de ejecución, el modelo fue interrumpido habiendo alcanzado únicamente un gap de 1.520%. Con el objetivo de cuantificar el impacto de forzar la inclusión de los puntos de generación que el modelo excluye de la solución óptima, se realiza un cálculo analítico bajo el supuesto de que toda la biomasa adicional es enviada directamente a la planta final.

Los ingresos por tonelada procesada sin densificar dependen del potencial energético de cada tipo de residuo: para el contenido ruminal el ingreso es de USD 54,60/ton y para la cáscara de arroz el ingreso es de USD 14,31/ton. Por otro lado, los costos por tonelada se componen de cuatro términos: el costo de adquisición de biomasa (USD 30/ton, valor asumido uniforme para todos los tipos de residuos en este trabajo), el costo de transporte hacia la planta final (USD 3,04/ton en promedio), el costo de operación de la planta final (USD 46,3/ton) y el costo de inversión de la planta final (USD 8,261/ton).

La incorporación de estos cuatro puntos de generación requiere aumentar la capacidad instalada de la planta final en 3.224 ton/mes. Considerando que Frigorífico Tacuarembó S.A. aporta 9.420 ton/año, Luchasol S.A. 72 ton/año, Damboriarena Ecosteguy SRL 14.016 ton/año y Saman - Planta Tacuarembó 15.180 ton/año, el impacto total sobre la función objetivo se resume en la Tabla 5.6 a continuación.

*Tabla 5.6. Impacto en la función objetivo por incorporar puntos de generación.*

Componente	Monto anual (USD)
Costo adicional de adquisición de biomasa	+1.160.640
Costo adicional de transporte	+117.612
Costo adicional de operación de planta final	+1.791.254
Costo adicional de inversión de planta final	+319.602
Ingreso adicional	-936.058
<b>Total</b>	<b>+2.453.050</b>

La función objetivo pasaría de -USD 1.596.662 a +USD 856.388, volviendo el proyecto no rentable. Este resultado confirma que la exclusión de estos puntos de generación por parte del modelo es correcta. Vale destacar que incluso si el costo de adquisición de la biomasa de cáscara de arroz y contenido ruminal fuera nulo, el sistema seguiría sin seleccionar estos puntos de generación, ya que el ingreso energético que generan no alcanza a cubrir los costos de transporte y operación de la planta final, independientemente del precio de compra de la materia prima. En estas condiciones, para que el procesamiento de estos residuos resultara rentable, el precio de venta de la energía debería superar los USD 468/MWh, aproximadamente seis veces el precio de referencia utilizado en el modelo.

### 5.2.5. Análisis de sensibilidad 5 - Transporte

La solución óptima obtenida presenta un costo de transporte equivalente al 2,1 % del costo total del sistema, valor que a primera vista puede resultar bajo. Por este motivo, se realiza un análisis exclusivo de transporte con el objetivo de identificar posibles variaciones que expliquen este resultado. Por un lado, el modelo asume condiciones ideales de circulación, mientras que en la práctica el transporte de biomasa está sujeto a diversas ineficiencias no contempladas. Por otro lado, se busca evaluar cómo la optimización territorial propia del modelo influye en los bajos costos observados.

#### 5.2.5.1. Variación de parámetros de velocidad media (Vel) y tiempos de carga/descarga (TCD)

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de la solución frente a posibles ineficiencias operativas, se analizaron variaciones en la velocidad media de circulación (Vel) y en los tiempos de carga y descarga de los camiones (TCD).

En primer lugar, se evalúa un escenario disruptivo en el que la velocidad se reduce de 80 km/h a 30 km/h, aproximando condiciones de tránsito pesado o infraestructura vial deficiente. Los resultados muestran que el costo total de transporte aumenta de USD 398.003 a USD 564.823, un incremento de USD 166.820 equivalente al 40% del costo de transporte base. El impacto recae sobre dos componentes: la compra de camiones, que se duplica al requerirse una flota mayor para mantener la misma cadencia de abastecimiento, y los salarios de conductores, que también se duplican debido al mayor tiempo efectivo de viaje. Se extiende el análisis a los casos 40 km/h y 50 km/h, la Figura 5.5 resume el comportamiento del costo de transporte para los cuatro escenarios evaluados.

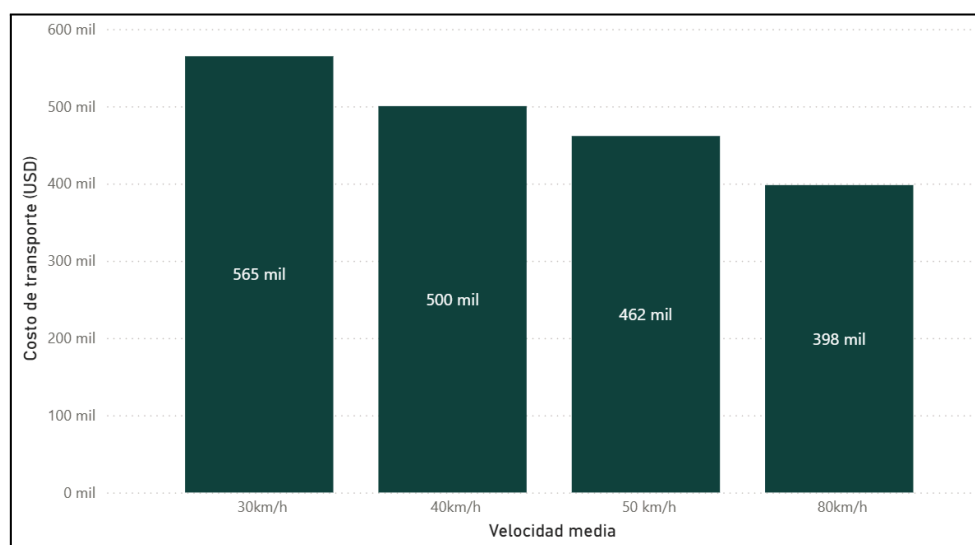


Figura 5.5. Costo de transporte según velocidad media de circulación.

Fuente: Elaboración propia.

A pesar del aumento relativo, el impacto sobre el sistema global es marginal. En el escenario más adverso, el costo de transporte aumenta USD 166.820 (+40 %), pero sigue representando menos del 3 % del costo total, y la decisión óptima sobre los puntos de generación y la apertura de plantas de densificación o finales permanece inalterada.

En segundo lugar, se analiza la sensibilidad frente a variaciones en los tiempos de carga y descarga (TCD). En la práctica, el tiempo que los camiones permanecen inmovilizados durante estas operaciones puede verse afectado por factores operativos tales como colas de espera, infraestructura, disponibilidad de maquinaria, o condiciones climáticas adversas. Para capturar este efecto, se evalúan escenarios en los que el TCD se duplica y triplica respecto al valor base. Los resultados se presentan en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Costos anuales de transporte según variaciones del tiempo de carga y descarga.

Componente	TCD	2 x TCD	3 x TCD
Combustible y mantenimiento (USD)	238.121	238.121	238.121
Compra de camiones (USD)	50.806	71.944	92.554
Salarios conductores (USD)	109.076	154.130	198.164
Costo total de transporte (USD)	398.003	464.195	528.839

El componente de combustible y mantenimiento permanece constante en todos los escenarios, dado que los kilómetros recorridos no se ven afectados por el TCD. En cambio, la compra de camiones y los salarios de conductores aumentan linealmente, al duplicar el TCD, ambos crecen aproximadamente un 40%, y al triplicarlo, un 80%. Esto refleja que un mayor tiempo improductivo en carga y descarga reduce la cantidad de viajes que cada camión puede realizar por día, obligando al modelo a incorporar más unidades y conductores para mantener el mismo volumen de biomasa transportado.

En términos del costo total de transporte, duplicar el TCD implica un aumento de USD 66.192 (+17%), mientras que triplicarlo USD 130.836 (+33%). A pesar de este incremento, el costo de transporte continúa representando una mínima fracción del costo total del proyecto, confirmando que la sensibilidad del modelo ante variaciones en la eficiencia logística es mínima.

### 5.2.5.2. Distribución territorial

La comparación entre la red óptima de briquetado y las redes de las tecnologías alternativas (peletizado y triturado) evidencia cómo la extensión territorial de captación de biomasa impacta directamente en los costos de transporte. Mientras que las tecnologías de pelletizado y triturado transportan la biomasa desde puntos cercanos a la planta final con un costo anual de USD 95.948, el briquetado amplía la cobertura incorporando biomasa de ubicaciones más alejadas mediante la planta de densificación intermedia. Esta expansión del área de captación aumenta el volumen total de biomasa utilizada en un 58 % y eleva el costo anual de transporte a USD 398.003, aproximadamente cuatro veces superior. Esta diferencia también se refleja en los kilómetros recorridos: 299.000 km frente a 73.000 km.

Este resultado evidencia que, incluso en un caso de estudio relativamente compacto, ampliar la cobertura territorial multiplica los costos logísticos. A escala nacional, donde los puntos de generación estarían distribuidos a mayores distancias, este efecto sería aún más pronunciado.

### 5.2.5.3. Obligación a utilizar la biomasa disponible de todos los puntos de generación e implicancias en transporte

El análisis evalúa el impacto en los costos de transporte al incluir la biomasa de los puntos de generación que no fueron seleccionados en la solución óptima. Se considera un horizonte mensual y se compara con el escenario base para el mismo período. Esta simplificación se debe a limitaciones de tiempo computacional, ya que resolver el modelo para todo un año con este caso supera las 48 horas.

Forzar el uso de todos los generadores aumenta la biomasa transportada en un 19 % (incorporando cuatro generadores adicionales), pero genera un incremento del 171 % en el costo de transporte. En términos de flota, la expansión de la cobertura requiere el doble de camiones y casi duplica el número de viajes.

Estos resultados evidencian que un aumento moderado de la biomasa utilizada implica un incremento mucho mayor en los costos logísticos, evidenciando que los puntos adicionales se encuentran en ubicaciones desfavorables. Esto refuerza la importancia de la selección de puntos de generación y de la localización de la planta de densificación para mantener la rentabilidad de la cadena de suministro. Además, sustenta que el bajo costo de transporte observado en la solución base ( $\approx 2\%$ ) se debe en parte a que el modelo opera en un área territorialmente compacta.

### **5.2.6. Análisis de sensibilidad 6 - Densificación Móvil**

La incorporación de plantas móviles de briquetado constituye un valor agregado de innovación en el modelo, y el presente análisis se centra exclusivamente en evaluar por qué esta alternativa no resulta óptima bajo las condiciones actuales del sistema.

El primer factor es la brecha de costo operativo: la planta móvil presenta un costo USD 31,8/ton, significativamente superior a los 17,5 USD/ton de la planta de densificación fija. Los ahorros en transporte que podría ofrecer la unidad móvil no compensan esta diferencia, haciendo que ninguna planta móvil resulte atractiva bajo las condiciones actuales. A esto se suma la limitada capacidad de procesamiento: mientras la planta fija puede procesar aproximadamente 9.500 ton/mes, cada unidad móvil alcanza solo 336 ton/mes, muy por debajo de los volúmenes generados en los principales puntos de generación. Esto implica que el equipo móvil sólo podría actuar como complemento, y la inversión necesaria para este rol no se recupera con los ahorros que genera.

Se ejecuta el modelo con distintos valores de costo de operación (OPD') para identificar el valor en el que el sistema incorporaría una planta móvil. La primera activación ocurre cuando dicho costo desciende a 12,1 USD/ton, una reducción del 62 % respecto al valor base. Incluso en este escenario, la mejora en la función objetivo es de apenas 2.974 USD (0,19 %), y la cantidad de biomasa transportada, la tasa de utilización y la energía generada permanecen prácticamente sin cambios, evidenciando que la planta móvil no aporta beneficio real al sistema.

Un caso particular se observa en la zafra arroceras, donde los molinos generan grandes volúmenes de cáscara concentrada. La capacidad de las unidades móviles es insuficiente para procesar estos volúmenes, y el bajo poder calorífico de la cáscara limita el ingreso energético por tonelada. Para que la operación fuera rentable, el precio de venta de energía debería multiplicarse por seis respecto al valor de referencia, lo que confirma la inviabilidad económica de la densificación in situ.

En conclusión, la densificación móvil no constituye una alternativa ni un complemento viable a la planta fija bajo las condiciones actuales. Las principales limitantes son el costo operativo, su baja capacidad de procesamiento y las restricciones de formulación que impiden combinar planta fija y móvil en un mismo nodo. Aunque esta tecnología podría ser relevante en el futuro bajo otros costos y supuestos, actualmente no resulta conveniente en el horizonte de planificación.

## 6. Conclusiones

En el presente proyecto se propone evaluar y diseñar estrategias logísticas eficientes para la gestión y valorización de biomasa residual en Uruguay, empleando modelado matemático para resolver un problema logístico complejo. A partir de su diseño e implementación se logra obtener una solución óptima, analizar su comportamiento frente a distintos escenarios y extraer conclusiones aplicables a esta temática.

Entre los hallazgos se destaca el rol que cumple la densificación dentro de la cadena de suministro. La solución óptima configura una red de dos niveles compuesta por una planta de densificación fija de briquetado y una planta de valorización energética. En este contexto, el resultado más significativo es que la densificación no se justifica por su rentabilidad energética directa, sino por la función logística que cumple dentro del sistema: amplía el alcance geográfico de la red e incorpora biomasa que de otro modo no podría utilizarse. No obstante, la solución muestra alta sensibilidad al poder calorífico obtenido tras el briquetado, por lo que la decisión de incorporar una planta de densificación intermedia depende críticamente de su capacidad para incrementar este parámetro. Esto subraya la necesidad de validarlo experimentalmente antes de avanzar hacia etapas de prefactibilidad.

Otro aspecto relevante es el comportamiento del transporte, aunque su peso en el costo total resulta bajo, esto responde a la configuración favorable del caso de estudio: los puntos de generación se encuentran concentrados geográficamente. Sin embargo, el análisis de sensibilidad muestra que esto no implica que el componente logístico sea poco relevante. Al incorporar puntos más alejados, aumentos moderados en la biomasa transportada generan incrementos desproporcionados en el costo de transporte. Esto sugiere que, en contextos con mayor dispersión geográfica, el transporte pasa a ser un factor mucho más determinante.

En lo que respecta a la viabilidad económica del sistema, el precio de venta de la energía y la eficiencia de conversión eléctrica se identifican como los parámetros de mayor incidencia sobre la viabilidad del sistema. Este resultado refuerza la importancia estratégica de contar, previo a la implementación de un proyecto de estas características, con contratos de compraventa de energía a largo plazo o con mecanismos que aseguren un precio mínimo de venta. Asimismo, el costo operativo de la planta final de valorización térmica surge como un factor especialmente relevante en la economía global del sistema, dado que representa una proporción significativa de los costos totales. Por lo tanto, una estimación más precisa de este parámetro podría mejorar de forma sustancial los indicadores económicos del sistema y modificar favorablemente su evaluación de viabilidad.

En cuanto a la densificación móvil, incorporada como componente innovador del modelo, no constituye una alternativa viable bajo las condiciones actuales del mercado. El costo operativo superior al de la planta fija, la limitada capacidad de procesamiento de las unidades móviles y las restricciones de co-localización del modelo actúan en conjunto e impiden su incorporación al sistema. El análisis determinó que incluso ante una reducción significativa del costo operativo del equipo móvil, el beneficio neto que obtendría el sistema sería marginal. La evaluación se extendió al caso de la densificación in situ en molinos arroceros durante la zafra, pero tampoco esta variante resultó viable: el volumen generado por cada molino supera la capacidad del conjunto de plantas móviles disponibles, y el bajo poder calorífico de la cáscara de arroz impide cubrir los costos operativos independientemente de la modalidad de procesamiento. Para que la operación fuera rentable, el precio de venta de energía debería sextuplicarse respecto al valor de referencia. No obstante, estos resultados no invalidan el potencial futuro de la tecnología, su incorporación debería reevaluarse conforme evolucionen los costos de los equipos por avances tecnológicos o economías de escala.

Más allá de los resultados particulares del caso de estudio, se logró un modelo de uso general cuyos parámetros pueden configurarse a través de archivos de entrada estándar, lo que permite adaptar el análisis a otras zonas del país o a distintos contextos de mercado sin necesidad de reformular la estructura matemática.

## 6.1. Trabajos futuros

Los resultados obtenidos abren varias líneas de investigación y desarrollo concretas.

En primer lugar, la extensión del modelo a escenarios de cogeneración constituye una oportunidad relevante a explorar. Esta línea presenta dos aplicaciones concretas: por un lado, la replicación del modelo en regiones del país donde ya existen industrias con demanda térmica próximas a los puntos de generación de biomasa; por otro, la posibilidad de que, en el largo plazo, la instalación de una planta de valorización energética atraiga industrias con requerimientos de calor en su entorno.

En relación con la modelización del transporte, actualmente se representa como un flujo entre nodos y no como un problema de ruteo de vehículos, lo que implica que no se capturan recorridos específicos, secuencias de recolección, consolidación de cargas ni ventanas horarias. La incorporación de un submodelo de ruteo (VRP) permitiría capturar estos aspectos operativos, lo cual resultaría especialmente relevante en escenarios con múltiples generadores de bajo volumen individual, donde la eficiencia del ruteo puede incidir significativamente en los costos de transporte.

Complementariamente, la evaluación de tecnologías alternativas al camión convencional diésel ofrece varias líneas de interés. El camión eléctrico resulta particularmente atractivo dado que las distancias medias del corredor Rivera–Tacuarembó son relativamente cortas, lo que podría hacer competitivo su uso operativo y reducir la huella de carbono de la cadena. Por su parte, el uso de bitrenes o tritrenes permitiría evaluar configuraciones con mayor capacidad de carga por viaje en corredores de alta densidad de flujo, reduciendo más aún el número de viajes requeridos y el costo logístico asociado. Asimismo, en escenarios de mayor escala o de expansión a zonas con acceso a infraestructura ferroviaria o fluvial, la incorporación de estos modos de transporte como alternativas o complementos al transporte carretero podría modificar la configuración óptima de la red. Cada una de estas alternativas requiere incorporar al modelo las restricciones regulatorias, de infraestructura y de costos propias de cada tecnología.

Otra línea relevante es la extensión geográfica del análisis. El caso de estudio se circunscribe al corredor Rivera–Tacuarembó, una zona con alta concentración de aserraderos y distancias relativamente cortas. Aplicar el modelo a otras regiones del país, como el corredor litoral oeste o la zona este con concentración de molinos arroceros, constituye una línea natural de escalamiento que pondría a prueba de forma más exigente el rol de la densificación como habilitador logístico.

Desde otra perspectiva, el modelo optimiza exclusivamente en base a costos e ingresos por venta de energía, sin considerar las externalidades positivas que genera el sistema. La reducción de emisiones por sustitución de combustibles fósiles, la disminución de la contaminación asociada a la acumulación de residuos y la generación de empleo rural son beneficios reales que podrían traducirse en ingresos. Incorporar estas dimensiones al modelo representaría una extensión relevante.

Por último, una línea de interés estratégico es aplicar el modelo al diseño de cadenas de suministro de biomasa para la producción de hidrógeno verde. El proyecto Kahirós, actualmente en construcción en Fray Bentos, marca el inicio de la economía del hidrógeno en Uruguay vinculada al sector forestal. En este marco, el modelo desarrollado podría utilizarse para evaluar la viabilidad logística de este tipo de iniciativas. Además, podría ampliarse incorporando el uso de camiones a hidrógeno como alternativa al transporte diésel, lo que permitiría analizar posibles sinergias entre la generación de energía a partir de biomasa y la descarbonización del transporte dentro de la propia cadena.

### **Declaración sobre uso de herramientas de inteligencia artificial**

Durante la elaboración de este trabajo se utilizaron herramientas de inteligencia artificial exclusivamente como apoyo para tareas de búsqueda bibliográfica, redacción, elaboración de dibujos representativos y programación en Python.

## 7. Bibliografía

- 3R-Machinery. (2026). *Mobile Slow-Speed Shredders | Industrial Shredders | 3R-Machinery*. 3rmachinery.com. <https://3rmachinery.com/products/mobile-slow-speed-shredders/>. Último acceso: febrero de 2026.
- Aamiri, O. B., Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., & Meda, V. (2019). *An “in-situ binding” approach to produce torrefied biomass briquettes*. *Bioengineering*, 6(4), 87. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040087>
- ACA-GMA-INIA-FAGRO-LATU. (2009). *Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para Arroz en Uruguay*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4927/1/Guia-de-Buenas-Practicas-Arroz-Uruguay-ACA.pdf>
- Administración Nacional de Puertos. (2024, April 2). *Primer ingreso de carga de celulosa en tren al puerto de Montevideo*. ANP. <https://anp.com.uy/index.php/es/inicio/comunicacion/noticias/primer-ingreso-de-carga-de-celulosa-en-tren-al-puerto-de-montevideo>. Último acceso: enero de 2026.
- Agencia EFE. (2021, December 7). *Empresa argentina produce energía a partir de residuos de ganado vacuno*. SWI Swissinfo.ch; [www.swissinfo.ch](http://www.swissinfo.ch). <https://www.swissinfo.ch/spa/empresa-argentina-produce-energ%C3%ADa-a-partir-de-residuos-de-ganado-vacuno/47173612>. Último acceso: enero de 2026.
- Ahmudi, A., Hudaya, C., Garniwa, I., Amraini, S. Z., Sugiyono, A., Semedi, J. M., Sidqi, M. A., Daulay, A. D. K., & Yumnaristya, S. H. (2025). Optimizing Potential Supply Chain of Biomass Agricultural Waste for Co-firing of Coal Power Plant Using MCDA, GIS, and Linear Programming in the Java and Sumatra Islands, Indonesia. *Leuser Journal of Environmental Studies*, 3(1), 1–19. <https://doi.org/10.60084/ljes.v3i1.249>
- Arévalo Híjar, J. M. (2018). *Diseño de un sistema integrado para la producción de briquetas de biomasa a partir del aprovechamiento de la cascarilla de arroz en el distrito de San Hilarión, San Martín [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]*. Repositorio Académico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/623483>
- Albashesheh, N. T. (2018, December). *Lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chain optimization with mobile densification and farmers’ choices*. Handle.net; Kansas State University. <http://hdl.handle.net/2097/39301>
- Albashesheh, N. T., & Heier Stamm, J. L. (2019). Optimization of lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chains with mobile pelleting. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 545–562. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.015>
- Alizadeh, P., Tabil, L. G., Adapa, P. K., Cree, D., Mupondwa, E., & Emadi, B. (2022). Torrefaction and Densification of Wood Sawdust for Bioenergy Applications. *Fuels*, 3(1), 152–175. <https://doi.org/10.3390/fuels3010010>
- Álvarez Villanueva, J. I., & Huamán Vidaurre, J. F. (2022). *Modelos hidrológicos para la estimación de caudal ecológico*. [https://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2414-10462022000200201&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2414-10462022000200201&script=sci_arttext)
- Andrea, M. (2020). *Modelo de generación de energía a partir de biomasa forestal*. *Uchile.cl*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134250>
- Asket. (2026). *Biomasser Multi mobile*. Biomasser.pl. <https://biomasser.pl/en/products-biomasser/mobile-en/>. Último acceso: febrero de 2026.

- Asociación de Cultivadores de Arroz (ACA), & Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). (2025). *Siembra de arroz: Un comienzo prometedor en un año de expansión (zafra 2024/2025)*.  
<https://www.aca.com.uy/wp-content/uploads/2025/01/Siembra-de-arroz-2024-2025.pdf>
- ANCAP - Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland.(s. f.). Histórico precios combustibles. Recuperado en abril de 2026, de <https://www.ancap.com.uy/10564/1/historico-precios-combustibles.html>
- AVEBIOM. (2020). *Por fin, una buena noticia para la generación eléctrica con biomasa | RETEMA*. RETEMA.  
<https://www.retema.es/actualidad/fin-una-buena-noticia-generacion-electrica-biomasa>  
 Último acceso: febrero de 2026.
- Akinyemi, B. A., Adedokun, M. J., & Ezekiel, O. O. (2024). Effects of densification variables on the quality properties of rice husk briquettes. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*, 6(6), 60–69. <https://doi.org/10.24018/ejfood.2024.6.6.859>
- Barreiro, R. (2025, May 31). *Uruguay apuesta por industria forestal pese a contaminación*. Biodiversidad En América Latina.  
<https://www.biodiversidadla.org/Articulos/Uruguay-apuesta-por-industria-forestal-pese-a-contaminacion>
- Batista, R. M., Converti, A., Pappalardo, J., Benachour, M., & Sarubbo, L. A. (2023). Tools for Optimization of Biomass-to-Energy Conversion Processes. *Processes*, 11(3), 854. <https://doi.org/10.3390/pr11030854>
- Bioenergy International. (2019, August 22). *Prodesa reveals PelletBOX – a containerized pellet plant*. Bioenergy International.  
<https://bioenergyinternational.com/prodesa-reveals-pelletbox-a-containerised-pellet-plant/>
- Bodie, A. R., Micciche, A. C., Atungulu, G. G., Rothrock, M. J., & Ricke, S. C. (2019). Current Trends of Rice Milling Byproducts for Agricultural Applications and Alternative Food Production Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00047>
- Börcsök, Z., & Pásztor, Z. (2020). The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(3), 511–526. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01637-3>
- Borzacconi, L., Passeggi, M., López, I., Castelló, E., Odriozola, M., Borges, L. I., & Pinotti, G. (2015). *Identificación de residuos en el Uruguay pasibles de ser valorizados por digestión anaerobia y estimación de su potencial de metanización*.
- Boscana, M., & Boragno, I. (2020). *Encuesta de Aserraderos 2020 Informe final, agosto 2020*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-09/INFORME%20FINAL.pdf>
- Böthig, S., Arrejuria, S., Bonfiglio, F., Cagno, M., Delgado, Y., Martínez, S., Rey, F., Cabot, P., & Martínez, D. (2021). *PROYECTO DE VALORIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN MECÁNICA DE LA MADERA INFORME FINAL*. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Informe%20General%20Final.pdf>
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy*, 28(1), 35–51. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.009>

- Caraballo, L., Correa, F., & Cordatti, A. (2021). *Modelo para la planificación eficiente del transporte forestal*. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/29898/1/CCC21.pdf>
- CIR Acondicionamiento Térmico. (2026). *Pellet de pino*. Circaldefaccion.com. [https://www.circaldefaccion.com/producto/pellet\\_de\\_pino\\_/3611](https://www.circaldefaccion.com/producto/pellet_de_pino_/3611). Último acceso: febrero de 2026.
- Civitarese, V., Acampora, A., Sperandio, G., Bassotti, B., Latterini, F., & Picchio, R. (2023). A Comparison of the Qualitative Characteristics of Pellets Made from Different Types of Raw Materials. *Forests*, 14(10), 2025. <https://doi.org/10.3390/f14102025>
- Da Cunda, P., & Cabrera, R. (2020). *Evaluación de la valorización de residuos sólidos orgánicos e implementación de sistemas naturales de tratamiento terciario de efluentes como estrategia para mejorar el desempeño ambiental de frigoríficos bovinos en Uruguay*. Facultad de Ingeniería, Universidad ORT Uruguay.
- Danielis, R., Niazi, A. M. K., Scorrano, M., Masutti, M., & Awan, A. M. (2025). The Economic Feasibility of Battery Electric Trucks: A Review of the Total Cost of Ownership Estimates. *Energies*, 18(2), 429. <https://doi.org/10.3390/en18020429>
- Díaz Tovar, D. (2019). *Usos potenciales de cascarilla de arroz en el departamento de Casanare*. [https://downloads.unido.org/ot/36/17/36170171/EvalRep\\_120323\\_GF\\_ID-4890\\_GFURU\\_TE\\_Report\\_2020\\_S.pdf.pdf](https://downloads.unido.org/ot/36/17/36170171/EvalRep_120323_GF_ID-4890_GFURU_TE_Report_2020_S.pdf.pdf)
- Díaz, E. (2022, November 25). *Biomass combustion - Bioenergy Review*. IEA Bioenergy Report 2023. <https://www.ieabioenergyreview.org/biomass-combustion>. Último acceso: febrero de 2026.
- DINAGUA - Dirección Nacional de Aguas. (2019). *DIVISIÓN SERVICIO HIDROLÓGICO REGIONALIZACIÓN DE ESTADÍSTICAS DE CAUDALES BANCO NACIONAL DE DATOS HIDROMÉTRICOS SISTEMA DE INFORMACIÓN HÍDRICA*. [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Regionaliza\\_2019\\_07.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Regionaliza_2019_07.pdf)
- Dirección Nacional de Aguas. (s. f.). *Visualizador DINAGUA: Inundaciones y drenaje pluvial urbano*. Ministerio de Ambiente. <https://lastmile.presidencia.gub.uy/portal/apps/webappviewer/index.html?id=8666d11d6b664b39b58a2b7471f64333>. Último acceso: abril de 2026.
- Dirección Nacional de Catastro. (s. f.). *geoCatastro*. <http://visor.catastro.gub.uy/visordnc/>. Último acceso: abril de 2026.
- El País. (2007). Consorcio molinero producirá energía con la cáscara extraída del arroz. <https://www.elpais.com.uy/economia-y-mercado/consorcio-molinero-producira-energia-con-la-cascara-extraida-del-arroz>
- Emmer, V., Cobas, P., González, M. J., Benzano, F., & Altez, M. (2017). *Valorización de residuos agroindustriales a través del Proyecto Biovalor y estimación de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero*. Trabajo presentado en el IX Congreso Nacional de AIDIS, Uruguay. <https://aidis.org.uy/wp-content/uploads/2020/10/III-2-Emmer.pdf>
- European Commission. (2020, September 27). *Mobile processing unit quickly turns biomass into pellets*. CORDIS | European Commission. <https://cordis.europa.eu/article/id/422212-mobile-processing-unit-quickly-turns-biomass-into-pellets>. Último acceso: enero de 2026.
- Faroppa, C., & MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2010). *Evaluación de la*

- disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional.*  
<https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20disponibilidad%20de%20residuos%20o%20subproductos%20de%20biomasa%20a%20nivel%20nacional%20-%20setiembre%202010.pdf>
- García Martínez, A., Portillo, B. A., Arriaga, C. M., & Nava, D. H. (2023, January 25). *Rastrojo de maíz tratado con urea como una alternativa para la alimentación de vacas lecheras. Parte 2. Técnica para el tratamiento.* Engormix.  
[https://www.engormix.com/lecheria/suplementacion-vaca-lechera/rastrojo-maiz-tratado-urea\\_a51960/](https://www.engormix.com/lecheria/suplementacion-vaca-lechera/rastrojo-maiz-tratado-urea_a51960/)
- GEMCO Energy. (n.d.). *Calorific value of different biomass pellets.* Www.pellet-Making.com.  
<https://www.pellet-making.com/blog/wood-pellets-calorific-value.html>. Último acceso: enero de 2026.
- GEMCO Energy. (2023, June 19). *Convenient Mobile Pellet Plant for Making Wood & Feed Pellets.* Gemco-Energy.com. <https://www.gemco-energy.com/mobile-pellet-plant.html>. Último acceso: enero de 2026.
- González Sotelo, V., Gutiérrez Álvarez, G., & Gutiérrez Parodi, S. (2025). *Desafíos logísticos de la valorización de residuos para la producción de químicos y energía.* O. D. Quiroga et Al. (Eds.), *Memorias de La 22° Conferencia Sudamericana de Ingeniería Industrial, de Producción Y Mecánica (SEPROSUL 2024)* (Pp. 22–29). Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional Del Litoral.. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19839.93608>
- Google. (s. f.). *Google Maps.* [google.com/maps](https://www.google.com/maps)
- Gutiérrez, S., Philippi, C., Kreimerman, R., Ures, P., & Torres, A. I. (2017). *Relevamiento de la biomasa disponible en Uruguay utilizable como materia prima en la producción de químicos.* Ponencia Presentada En vi Encuentro Regional de Ingeniería Química (vi ERIQ), Montevideo, Uruguay.  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/36885/1/GPKUT16.pdf#:~:text=Luego%2C%20se%20profundiz%C3%B3%20en%20aquellas,geogr%C3%A1fica%20de%20los%20sitios%20de>
- Hacker, J., & Analytics, R. (2005). *Effects of Logging Residue Removal on Forest Sites A Literature Review.*  
<https://dnr.wisconsin.gov/sites/default/files/topic/ForestBusinesses/LoggingResidueReport.pdf>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2001). *Introduction to operations research (7.ª ed.). McGraw-Hill, The McGraw-Hill Companies, Inc.*
- Hyundai Motor Company. (n.d.). *XCIENT Fuel Cell Truck | Hydrogen Truck | Hyundai Motor Company.* Hyundai Electrified Commercial Vehicles.  
<https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev>
- Ibitoye, S. E., Jen, T.-C., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2021). *Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. Bioresources and Bioprocessing*, 8(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>
- INAC – Instituto Nacional de Carnes. (2025). *Exportación.* Inac.uv.  
<https://www.inac.uv/innovaportal/v/27775/37/innova.bs/exportacion>. Último acceso: diciembre de 2025.
- INE - Instituto Nacional de Estadística. (2024). 4.7.9 - *Indicadores del transporte ferroviario, por*

- año, según carga y pasajeros. Instituto Nacional de Estadística. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2024-volumen-n-101/47-transporte-6>. Último acceso: diciembre de 2025.
- INE - Instituto Nacional de Estadística. (2025). *Factores de conversión en base al poder calorífico inferior*. Instituto Nacional de Estadística. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2025-vol-102/45-energia/452-factores>. Último acceso: enero de 2026.
- INFOBAE. (2024, September 16). *Economía circular en acción: un frigorífico convierte desechos en biogás y compost*. Infobae. <https://www.infobae.com/revista-chacra/2024/09/08/economia-circular-en-accion-un-frigorifico-co-convierte-desechos-en-biogas-y-compost/>. Último acceso: octubre de 2025.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2016). *Valorizar la biomasa de especies de eucaliptus mediante el proceso de torrefacción/peletización*. INIA. <https://inia.uy/proyectos/valorizar-la-biomasa-de-especies-de-eucaliptus-mediante-el-proceso-de>
- Jacobson, R., Shahab Sokhansanj, Roeser, D., Hansen, J., Bhushan Gopaluni, & Bi, X. (2021). A Cost Analysis of Mobile and Stationary Pellet Mills for Mitigating Wildfire Costs. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 11(03), 131–143. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2021.113010>
- Japhet, J. A., Tokan, A., & Muhammad, M. H. (2015). *Production and characterization of rice husk pellet*. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. [www.ajer.org](http://www.ajer.org). <https://www.ajer.org>
- Kaur, A., Roy, M., & Kundu, K. (2017). *DENSIFICATION OF BIOMASS BY BRIQUETTING: A REVIEW*. 8(10), 20561–20568. <https://doi.org/10.24327/ijrsr.2017.0810.0916>
- Khanchi, A., Jones, C. L., Sharma, B., & Huhnke, R. L. (2013). Characteristics and compositional change in round and square switchgrass bales stored in South Central Oklahoma. *Biomass and Bioenergy*, 58, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.017>
- Kizha, A. R., Han, H.-S., Paulson, J., & Koirala, A. (2018). Strategies for Reducing Moisture Content in Forest Residues at the Harvest Site. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(1), 25–33. <https://doi.org/10.13031/aea.12427>
- Komptech. (2024). *Crambo mobile*. Komptech. <https://www.komptech.com/en/products/crambo-mobile/>. Último acceso: enero de 2026.
- KPMG Sociedad Civil, & SEG Ingeniería. (2015, August). *Análisis de componente nacional e impacto económico y social que surge de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables*. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Informe%204%20-%20Biomasa.pdf>
- Lippel. (2024). *Convirtiendo residuos de biomasa en briquetas y pellets*. Lippel.com.br. <https://lippel.com.br/es/entender-mas/seguir-briquetas-y-granulacion>
- Livingston, W. R. (2016). *The status of large scale biomass firing: The milling and combustion of biomass materials in large pulverised coal boilers*. IEA Bioenergy Task 32. [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2016/03/IEA\\_Bioenergy\\_T32\\_cofiring\\_2016.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2016/03/IEA_Bioenergy_T32_cofiring_2016.pdf)
- Marcos, F. (n.d.). *Pélets y briquetas*. [https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo\\_2293\\_9990.pdf](https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf)
- Marin, G., Pérez, J., & Aguilar, O. (2019). Propuesta de densificación energética de residuos y

- recursos biomásicos mediante peletización. *Revista de Iniciación Científica*, 5(1), 67–70. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.1.2239>
- Marreiro, H. M. P., Peruchi, R. S., Lopes, R. M. B. P., Andersen, S. L. F., Eliziário, S. A., & Rotella Junior, P. (2021). Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*, 14(24), 8320. <https://doi.org/10.3390/en14248320>
- Martelli, R., Bentini, M., & Monti, A. (2015). Harvest storage and handling of round and square bales of giant reed and switchgrass: An economic and technical evaluation. *Biomass and Bioenergy*, 83, 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.008>
- Martínez, J. (2018). Cogeneración de energía eléctrica y vapor con cáscara de arroz. Galofer S.A. Conferencia presentada en la Jornada Apertura de Arroz 2018. Último acceso: enero de 2026. [https://acpaarrozcorrientes.org.ar/Jornada\\_Apertura\\_de\\_Arroz\\_2018/CONFERENCIAS/Galofe-Cogeneracion.EE.y.vapor.con.cascara.arroz.2018.Jorge.Martinez.pdf](https://acpaarrozcorrientes.org.ar/Jornada_Apertura_de_Arroz_2018/CONFERENCIAS/Galofe-Cogeneracion.EE.y.vapor.con.cascara.arroz.2018.Jorge.Martinez.pdf)
- Marulanda-Cataño, J. S., & Quiroz-Restrepo, L. F. (2020). *Alternativa de gestión del contenido ruminal mediante aprovechamiento energético*. Repositorio Institucional UPB. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/8243>
- McCormick, G. P. (1976). Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I — Convex underestimating problems. *Mathematical Programming*, 10(1), 147–175. <https://doi.org/10.1007/bf01580665>
- MGAP-DIEA - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección de Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Encuesta de arroz: Zafra 2020/21*. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-09/Pub\\_Arroz%202020\\_21.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-09/Pub_Arroz%202020_21.pdf). Último acceso: abril de 2026.
- MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2015). *Regiones agropecuarias del Uruguay MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS DIEA*. <https://www.mgap.gub.uy/dieaanterior/regiones/regiones2015.pdf>
- MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2025a). *Anuario Estadístico Agropecuario 2025*. Ministerio de Ganadería, Agricultura Y Pesca. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-agropecuario-2025>
- MGAP - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2025b). *Superficie Forestal del Uruguay*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2025-02/Superficie%20Plantado%20Informe%202024.pdf>
- MGAP-DNF - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, & Dirección General Forestal. (2025). *Boletín estadístico del sector forestal 2025*. <https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/Boletin%20Estadistico%20DGF%202025.pdf>
- MGAP - OPYPA - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2024). *Anuario OPYPA 2024* (32.<sup>a</sup> ed.). Oficina de Programación y Política Agropecuaria. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/anuario-opypa-2024>
- MGAP - OPYPA - Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2025). *Anuario OPYPA 2025* (33.<sup>a</sup> ed.). Oficina de Programación y Política Agropecuaria. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2025>

- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2022a). *Definiciones de biomasa según distintas fuentes*. Ministerio de Industria, Energía Y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/definiciones-bio-masa-segun-distintas-fuentes>. Último acceso: febrero de 2026.
- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2022b). *Plantas en operación: Lumin*. Ministerio de Industria, Energía Y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/publicaciones/plantas-operacion-lumin>. Último acceso: enero de 2026.
- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2025a). *Proyectos demostrativos Biovalor : Ontilcor*. Ministerio de Industria, Energía Y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/publicaciones/proyectos-demostrativos-biovalor-ontilcor>. Último acceso: noviembre de 2025.
- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2025b). *Uruguay vuelve a registrar niveles récord de fuentes renovables en la matriz de generación eléctrica*. Ministerio de Industria, Energía Y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/uruguay-vuelve-registrar-niveles-record-fuentes-renovables-matriz-generacion>
- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2025c, August 21). *Balance Energético Nacional es insumo relevante para elaborar políticas públicas*. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/cardona-balance-energetico-nacional-es-insumo-relevante-para-elaborar-politicas-publicas>
- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2018). *Ficha Técnica de Residuos – Frigoríficos (Proyecto Biovalor)*. Montevideo: MIEM-DNE. [https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Residuos%20-%20Frigor%C3%ADficos\\_0.pdf#:~:text=lavado%20de%20los%20est%C3%B3magos%20e,y%20salas%20de%20espera%20del](https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Residuos%20-%20Frigor%C3%ADficos_0.pdf#:~:text=lavado%20de%20los%20est%C3%B3magos%20e,y%20salas%20de%20espera%20del). Último acceso: febrero de 2026.
- MIEM - Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2022). *Plantas en operación: Galofer*. Ministerio de Industria, Energía Y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/publicaciones/plantas-operacion-galofe>. Último acceso: enero de 2026.
- Ministerio de Ambiente (Uruguay). (2025). *Criterios para la clasificación de proyectos de represamiento de aguas superficiales*. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/DO-EIA-042-02%20Criterios%20clasificacion%20represas%2008.01.2025%20para%20la%20web.pdf>. Último acceso: febrero de 2026.
- Ministerio de Ambiente (Uruguay), & DINAGUA -Dirección Nacional de Aguas. (2025). *ANUARIO HIDROLÓGICO: COMPENDIO 2021/2022 - 2022/2023 - 2023/2024*. [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2025-12/ANUARIO%202021-2024\\_publicar.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2025-12/ANUARIO%202021-2024_publicar.pdf)
- Montes del Plata. (2012, July 24). *Bautismo de la primera barcaza para Montes del Plata fabricada por el Clúster Naval uruguayo | Montes del Plata*. Montes Del Plata. <https://www.montesdelplata.com.uy/bautismo-de-la-primera-barcaza-para-montes-del-plata-fabricada-por-el-cluster-naval-uruguayo-8?nid=435>. Último acceso: enero de 2026.
- MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2019). *Tramos para Vehículos de Alto Desempeño (VAD)*. Google My Maps. <https://www.google.com/maps/d/u/1/viewer?mid=1m1VPHJRpFDskeGhRX2dl6pgnbmpeXM>

- Y&l=-32.29737819554445%2C-55.07987874101755&z=7. Último acceso: diciembre de 2025.
- MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2020). *Decreto N 303/020*. Impo.com.uy. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/303-2020/10>. Último acceso: noviembre de 2025.
- MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2021). *Decreto N 177/021*. Impo.com.uy. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/177-2021/6>. Último acceso: noviembre de 2025.
- MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2023). *Tramos autorizados para Vehículos de Alto Desempeño (VAD)*. Ministerio de Transporte Y Obras Públicas. <https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/comunicacion/publicaciones/tramos-para-vehiculos-alto-desempeno-vad>. Último acceso: noviembre de 2025.
- MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2024). *Corredores autorizados para circulación con equipos de 48t*. Google.com. <https://www.google.com/maps/d/u/1/viewer?mid=1ItJF46AW9U8Zaovq0VJ81mpRf8AC6aM&l=-32.7847287062784%2C-55.43956748764799&z=12>. Último acceso: noviembre de 2025.
- MTOP - Ministerio de Transporte y Obras Públicas, & Dirección Nacional de Transporte Ferroviario. (2025). *DECLARACIÓN DE LA RED FERROVIARIA Año 2025 Dirección Nacional de Transporte Ferroviario*. <https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/sites/ministerio-transporte-obras-publicas/files/documentos/publicaciones/Declaraci%C3%B3n%20de%20Red%202025.pdf>. Último acceso: diciembre de 2025.
- Mutuberría, M., Larrosa, V., Belén Giménez, & Graiver, N. (2023). Maximizando el valor nutricional: reutilización de un subproducto de la industria arrocera en alimentos saludables. *Innotec*, 26. <https://doi.org/10.26461/26.06>
- Naciones Unidas en Uruguay. (2020). *Biovalor: acabemos con los residuos*. Uruguay. <https://uruguay.un.org/es/51096-biovalor-acabemos-con-los-residuos>. Último acceso: enero de 2026.
- Natural Resources Canada. (2016). *Solid Biofuels Bulletin No. 2 PRIMER FOR SOLID BIOFUELS DEFINITIONS, CLASSES/GRADES AND FUEL PROPERTIES*. [https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/files/NRCAN\\_BB\\_no2\\_e13.pdf](https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/files/NRCAN_BB_no2_e13.pdf)
- Nguyen, Q. A., Tucker, M. P., Keller, F. A., & Resch, M. G. (2020). *Towards total and sustainable utilization of biomass resources*. Osti.gov. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1593920>
- Nielsen, C. F. (2026, March 2). *Mobile Briquetting Solutions | Compact, Efficient & Portable*. Cfnielsen.com. <https://cfnielsen.com/product/mobile-briquetting-solutions/>
- NSW Department of Primary Industries. (2019). *Biomass for bioenergy – Pellets factsheet*. [https://www.dpi.nsw.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/1225238/Factsheet-PELLETS-Accessible.pdf](https://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/1225238/Factsheet-PELLETS-Accessible.pdf). Último acceso: noviembre de 2025.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., Loureiro, L. M. E. F., Sá, L. C. R., Silva, H. F. C., Rodrigues, A. M., Causer, T. P., DeVallance, D. B., & Ciolkosz, D. E. (2021). Evaluation of the Potential of Agricultural Waste Recovery: Energy Densification as a Factor for Residual Biomass Logistics Optimization. *Applied Sciences*, 11(1), 20. <https://doi.org/10.3390/app11010020>
- Nurek, T., Gendek, A., & Roman, K. (2019). *Forest residues as a renewable source of energy:*

*Elemental composition and physical properties* :: *BioResources*. Bioresources.cnr.ncsu.edu. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/forest-residues-as-a-renewable-source-of-energy-elemental-composition-and-physical-properties/>

- O'Neill, E. G., Geissler, C. H., & Maravelias, C. T. (2024). Large-scale spatially explicit analysis of carbon capture at cellulosic biorefineries. *Nature Energy*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01532-8>
- O'Neill, E. G., Martinez-Feria, R. A., Basso, B., & Maravelias, C. T. (2025). *Available land for cellulosic biofuel production: A supply chain centered comparison*. *Environmental Research Letters*, 20, 014067.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina: WISDOM Argentina (Informe final)*. [https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/probiomasa/WISDOM\\_Arg\\_Informe\\_Final.pdf](https://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/probiomasa/WISDOM_Arg_Informe_Final.pdf). Último acceso: diciembre de 2025.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *APENDICE IV*. [Fao.org. https://www.fao.org/4/t0269s/T0269S14.htm](https://www.fao.org/4/t0269s/T0269S14.htm)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *Residuos de madera para la generación de energía*. Depósito de documentos de la FAO. <https://www.fao.org/4/t0269s/t0269s05.htm>
- Paraschiv, G., Moiceanu, G., Voicu, G., Chitoiu, M., Cardei, P., Dinca, M. N., & Tudor, P. (2021). Optimization Issues of a Hammer Mill Working Process Using Statistical Modelling. *Sustainability*, 13(2), 973. <https://doi.org/10.3390/su13020973>
- Pelekais, C. (2000). *Métodos cuantitativos y cualitativos: diferencias y tendencias*. *Telos*, 2(2), 347–352.
- Pena, G., Curto-Risso, P., Mantero, C., Siri, G., Tancredi, N., Amaya, A., Durante, A., Ibañez, A., Ernst, F., Braga, L., & Flores, M. (2017). Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales. *Handle.net*. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31287>
- Piegas, F. (2024). *Arroz: situación y perspectivas*. <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/CP/11/CP11web/C11-Arroz.pdf>
- Pineda-Pineda, J., Sánchez del Castillo, F., Ramírez-Arias, A., Castillo-González, A. M., Valdés-Aguilar, L. A., & Moreno-Pérez, E. del C. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 18(1). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2012000100007](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000100007)
- Piñeyro, P. (2023). *Modelado y optimización de cadenas de suministro de biomasa: Restricciones físicas y eficiencia operativa en el transporte*. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- PNUD - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2013). *Contratación n° 2/11: Consultor internacional para el “Análisis del Estado del Arte a nivel del sector forestal con una perspectiva global Informe final” Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo URUGUAY Montevideo, junio de 2013*. [https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/2013\\_Informe\\_final\\_estado\\_del\\_arte\\_nivel\\_forestal\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/2013_Informe_final_estado_del_arte_nivel_forestal_0.pdf). Último acceso: diciembre de 2025.

- Possidônio, E. F. da S. C., Silva, J. E. A. R. da, & Toso, E. A. V. (2016). *Biomass supply chain analysis with densified waste*. *Revista Árvore*, 40(2), 355–362. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200018>
- Prasad, S., Alvin Ray Womac, Nehru Chevanan, & Shahab Sokhansanj. (2008). *Comminution Properties of Biomass in Hammer Mill and its Particle Size Characterization*. 2008 Providence, Rhode Island, June 29 - July 2, 2008. <https://doi.org/10.13031/2013.24869>
- Presidencia de la República Oriental del Uruguay. (2023). *Hidrovia que llega a Nueva Palmira permitió movilizar más de 25 millones de toneladas en 2022*. Presidencia Uruguay. <https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/hidrovia-llega-nueva-palmira-permitio-movilizar-25-millones-toneladas-2022>. Último acceso: febrero de 2026.
- Psathas, F., Georgiou, P. N., & Rentizelas, A. (2022). Optimizing the Design of a Biomass-to-Biofuel Supply Chain Network Using a Decentralized Processing Approach. *ProQuest*, 5001. <https://doi.org/10.3390/en15145001>
- Ramboll. (n.d.). *Conversion to renewables: Avedøre plant - Ramboll Group*. [www.ramboll.com](http://www.ramboll.com). <https://www.ramboll.com/projects/energy/conversion-to-renewables-avedore-plant>. Último acceso: febrero de 2026.
- Rhenals Julio, J. D., Mendoza Fandiño, J. M., De La Vega González, T. D. J., & Sofán German, S. J. (2021). Evaluación energética de la co-combustión de contenido ruminal-metano en frigoríficos y mataderos del departamento de Córdoba-Colombia. *Latin American Developments in Energy Engineering*, 2(1), 44–53. <https://doi.org/10.17981/ladee.02.01.2021.5>
- RICHI Machinery. (s. f.). Rice husk pellet plant solution. Último acceso: abril de 2026. <https://www.richipelletmachine.com/rice-husk-pellet-plant/>
- Rico, J. (2015, January 26). *Sangre de mataderos para producir biogás en bombonas*. *Energías Renovables, El Periodismo de Las Energías Limpias.; Energías Renovables*. <https://www.energiyas-renovables.com/bioenergia/sangre-de-mataderos-para-producir-biogas-en-20150126>. Último acceso: diciembre de 2025.
- Sovann, R., Kurniawan, T. A., & Oanh, N. T. K. (2023). Estimating potential energy generation from rice husk in Cambodia. *International Journal of Environment and Energy*, 12(2), 37–47. <https://ijeer.forexjournal.co.in/papers-pdf/ijeer-120237.pdf>
- Su, D., & Yu, M. (2019). *Study of Corn Stover Particle Size Distribution Characteristics for Knife Mill and Hammer Mill*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 358(5), 052060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/358/5/052060>
- Sustainable Energy Authority of Ireland. (2020). *Biomass CHP technology guide*. <https://www.seai.ie/sites/default/files/grants/business-grants/support-scheme-renewable-heat/Biomass-CHP-Technology-Guide.pdf>
- Tauro, R., José Ezequiel Santibañez-Aguilar, Heras, R. R., Antonio, O., Caballero, J. L., Odenthal, J., Arroyo, J. M., Borja Velázquez Martí, & Ghilardi, A. (2022). Optimización de costos de transporte para el aprovechamiento energético de la biomasa. *Revista Geográfica*, 165, 11–29. <https://doi.org/10.35424/regeo.165.2022.1126>
- Tolosana, E., Ambrosio, Y., Laina, R., & Martínez Ferrari, R. (2008). *Guía de la maquinaria para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal*. [https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/Guia\\_Maquinaria\\_Biomasa.pdf](https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/Guia_Maquinaria_Biomasa.pdf)
- Torres Rippa, A. I., Gutiérrez, S., & R, K. (2019). *Biorefinerías en Uruguay: Evaluación*

*tecnó-económica de la producción de combustibles y químicos a partir de materia prima y residuos nacionales.* Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería Química.

- Transport & Environment. (2022). *Electric trucks take charge.* [https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202210\\_TE\\_trucks\\_briefing\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202210_TE_trucks_briefing_final.pdf). Último acceso: febrero de 2026.
- Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenny, K. L., & Hess, J. R. (2010). *A review on biomass densification technologies for energy application.* Sswm.info. [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/Tumuluru%20et%20al.%202010%20A%20review%20on%20biomass%20densification\\_0.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/Tumuluru%20et%20al.%202010%20A%20review%20on%20biomass%20densification_0.pdf)
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, 7(5), 384–401. <https://doi.org/10.1089/ind.2011.7.384>
- U.S. Department of Energy. (2016, September 15). *Biomass for Electricity Generation | WBDG - Whole Building Design Guide.* Wbdg.org. <https://www.wbdg.org/resources/biomass-electricity-generation>. Último acceso: febrero de 2026.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2007). *EPA Combined Heat and Power Partnership Biomass CHP Catalog 6. Power Generation Technologies.* [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/biomass\\_combined\\_heat\\_and\\_power\\_catalog\\_of\\_technologies\\_6.\\_power\\_generation\\_technologies.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/biomass_combined_heat_and_power_catalog_of_technologies_6._power_generation_technologies.pdf). Último acceso: febrero de 2026.
- Uche Paul Onochie, Aliu, S., U. Nosegbe, & Kenneth Kennedy Adama. (2020). Comparative study and experimental analysis of pellets from biomass sawdust and rice husk. *Journal of Advances in Science and Engineering*, 3(2). <https://doi.org/10.37121/jase.v3i2.84>
- UPM. (2018). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL Reporte preliminar Proyecto de planta de celulosa.* <https://www.upm.es/siteassets/documents/growth/planta-de-celulosa-upm-esia-presentacion-2018-es.pdf>. Último acceso: enero de 2026.
- Uruguay XXI. (2025). *Informe Anual de Comercio Exterior de Uruguay – 2024.* <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-anual-de-comercio-exterior-de-uruguay-2024/?download=es#:~:text=La%20carne%20bovina%20ocup%C3%B3%20el,Los%20vol%C3%BAmenes>
- UTE. (2024). Central de generación termoeléctrica José Batlle y Ordóñez. <https://www.ute.com.uy/central-de-generacion-termoelectrica-jose-batlle-y-ordonez-0>
- Vaish, S., Sharma, N. K., & Kaur, G. (2022). A review on various types of densification/briquetting technologies of biomass residues. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1228(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1228/1/012019>
- Varela Milla, O., Rivera, E. B., Huang, W.-J., Chien, C.-., & Wang, Y.-M. (2013). Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, ahead. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162013005000022>

- Vitoriano, B., & Ramos, A. (2023). *Programación matemática: Modelos de optimización*. Universidad Complutense de Madrid. Mat.ucm.es. <http://blogs.mat.ucm.es/>
- Williams, H. P. (1999). *Model Building in Mathematical Programming*. 4th Edition. John Wiley and Sons.
- World Bank Group. (2025, December 5). *Fact Sheet: First Green Hydrogen Project in Uruguay*. World Bank; World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/news/factsheet/2025/12/01/fact-sheet-primer-proyecto-de-hidrogeno-verde-en-uruguay>. Último acceso: febrero de 2026.
- World Bioenergy Association. (2014). *A fast growing energy carrier*. [www.worldbioenergy.org](http://www.worldbioenergy.org). <https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Pellets.pdf>. Último acceso: enero de 2026.
- Yang, Y., Song, L., Li, Y., Shen, Y., Yang, M., Wang, Y., Zheng, H., Qi, W., & Lei, T. (2025). Effects of Different Biomass Types on Pellet Qualities and Processing Energy Consumption. *Agriculture*, 15(3), 316. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030316>
- Yu, M., Womac, A., & Pordesimo, L. (2003, July 27). *Review of Biomass Size Reduction Technology*. <https://scispace.com/pdf/review-of-biomass-size-reduction-technology-2r5wflhaqs.pdf>
- Zambrano Zambrano, G. A., García Macías, V. L., Cedeño Palacios, C. A., & Alcívar Cedeño, U. E. (2021). Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa. *Polo Del Conocimiento: Revista Científico - Profesional*, 6(4), 415–437. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7927005>

## 8. Anexos

### Anexo I.

La cantidad disponible de contenido ruminal se estima a partir del total de cabezas de ganado bovino faenadas durante 2024, que según el INAC (2025) es de 2.256.123 cabezas. Aplicando el factor de generación de 36 kg de contenido ruminal por cabeza faenada reportado por Borzacconi et al. (2015), se obtiene una disponibilidad total de aproximadamente 81.221 toneladas anuales.

La cantidad disponible de cáscara de arroz se estima a partir de los datos de producción de la zafra 2024/2025, que registró una superficie sembrada de 182.900 ha con un rendimiento promedio de 9,3 ton/ha, resultando en una producción de arroz cáscara de aproximadamente 1.700.000 toneladas (MGAP-OPYPA, 2025). Dado que la cáscara representa el 20 % del peso del arroz cáscara (Faroppa, 2010), y que de ella se aprovecha el 80% (Sovann et al., 2023) se obtiene una disponibilidad de 272.160 toneladas anuales de este residuo.

La estimación de rastrojo disponible se obtiene combinando las tasas de generación por cultivo reportadas por Torres Rippa et al. (2019) con las superficies sembradas del Anuario Estadístico Agropecuario 2025 (MGAP-DIEA, 2025). Los resultados se presentan en la Tabla 8.1. El rastrojo total estimado es de 11.318.090 toneladas anuales. Dado que no toda esa cantidad es técnicamente recuperable por limitaciones operativas y por la necesidad de mantener cobertura de suelo para evitar erosión (Torres Rippa et al., 2019), se consideran dos escenarios de aprovechamiento: 25 % y 40 %.

*Tabla 8.1. Datos de rastrojos de cultivo.*

Cultivo	Superficie sembrada (kha)	Tasa de generación de rastrojo (ton/ha)	Total de rastrojo (ton)
Soja	1229,2	4,5	5.531.400
Maíz	259,9	6,8	1.767.320
Arroz	182,9	11,1	2.030.190
Trigo	355,6	3,3	1.173.480
Cebada	271,9	3	815.700
<b>TOTAL</b>			<b>11.318.090</b>
25% aprovechable			2.829.523
40% aprovechable			4.527.236

La disponibilidad de residuos de aserradero se estima a partir de la Encuesta de Aserraderos 2020 (Boscana & Boragno, 2020), que reporta un consumo de 1.117.800 m<sup>3</sup> de madera. Considerando que el 53.74 % del volumen de madera procesada corresponde a residuos (Faroppa, 2010; Torres Rippa et al., 2019), se obtienen 600.706 m<sup>3</sup> de residuos anuales. Aplicando el factor de conversión de 0,45 ton/m<sup>3</sup> reportado por Faroppa (2010), la disponibilidad estimada de residuos de aserradero se estima en 270.318 toneladas anuales.

Los residuos generados de silvicultura se estiman a partir de los datos presentados en Torres Rippa et al. (2019), que incluyen la cantidad de residuos generados totales que son 2.733.905 toneladas/año. Según Gutiérrez et al. (2017), se aprovecha de estos residuos del 50% al 70%, por lo que se estima una disponibilidad anual de 1.640.343 toneladas.

En la Tabla 8.2 se muestran las fuentes de donde se obtienen los valores mostrados en la Tabla 2.1.

*Tabla 8.2. Fuentes de datos de tabla.*

Fuente	Cita
(1)	(Rhenals Julio et al., 2021)
(2)	(Díaz Tovar, 2019)
(3)	(García-Martínez et al., 2023)
(4)	(Pineda-Pineda et al., 2012)
(5)	(Nurek et al., 2019)
(6)	(Torres Rippa et al.,2019)
(7)	(Gutiérrez et al.,2017)
(8)	(Faroppa, 2010)

## **Anexo II.**

En el siguiente [enlace](#) (archivo Excel “*Anexo II - Residuos por Punto de Generación*”) se recopila información de los aserraderos, frigoríficos y molinos arroceros de Uruguay. Para cada establecimiento se detalla:

- Nombre.
- Coordenadas geográficas.
- Residuos generados por año.
- Potencial energético disponible por año.

### **Anexo III.**

En el siguiente [enlace](#) (documento Excel “*Anexo III - Selección de Padrones*”) se adjuntan las matrices elaboradas para el estudio de cauces de agua y la evaluación de padrones en el caso de estudio. Entre ellas se incluyen:

- La matriz de estudio de caudales de los principales cauces de agua en la zona de estudio.
- La matriz de atributos ponderados utilizada para el análisis de padrones.
- La matriz de evaluación de los padrones candidatos en función de los atributos ponderados definidos.

## Anexo IV.

El siguiente fragmento corresponde al paso de preprocesamiento en que se determinan las ubicaciones candidatas para plantas de densificación. Como mencionado en el cuerpo del informe, el algoritmo opera en dos etapas: primero filtra los nodos de la red vial que pertenecen a rutas óptimas entre puntos de generación y plantas finales, restringiéndolos a la Ruta Nacional N°5. Luego aplica un criterio de máxima dispersión geográfica para seleccionar el subconjunto final de candidatas.

En la Figura 8.1 se observa que el primer nodo elegido es el más cercano al centroide de la región. Luego, en cada iteración se elige el nodo más alejado del conjunto ya seleccionado, con separación mínima de 5 km. Esto garantiza cobertura uniforme a lo largo del corredor.

```
primera = candidatos_gdf.nsmallest(1, 'dist_centro').iloc[0] # Nodo inicial

for i in range(1, MAX_CANDIDATES):
    # Para cada candidato disponible, calcular su distancia mínima
    # al conjunto ya seleccionado
    mejores_nodos = [n for n in nodos_disponibles
                     if min_dist_al_conjunto(n) >= MIN_DISTANCE_KM]

    # Elegir el más alejado
    mejor = max(mejores_nodos, key=lambda x: x['min_dist'])
    candidatas_coords.append((mejor['lat'], mejor['lon']))
```

*Figura 8.1. Pseudocódigo del algoritmo de máxima dispersión geográfica para la selección de ubicaciones candidatas para plantas de densificación.*

Posteriormente en la Figura 8.2 se agregan dos grupos de puntos de generación como candidatas de densificación: los 5 con mayor volumen de biomasa disponible y los que no tienen ruta directa factible a ninguna planta final, para quienes la densificación es condición necesaria para su inclusión en el sistema.

```
top_5_grandes = demand.nlargest(5, 'tons')['id'].tolist()

generadores_sin_directo = [p for p in demand['id']
                           if no_tiene_ruta_directa(p, distancias_pg, dm_vals)]

generadores_a_agregar = list(set(top_5_grandes + generadores_sin_directo))
```

*Figura 8.2. Pseudocódigo para la incorporación de puntos de generación como ubicaciones candidatas adicionales para plantas de densificación.*

## **Anexo V.**

Se pueden encontrar adjuntos en el siguiente [enlace](#) (documento Excel “*Anexo V - Datos Modelo*”) los datos relevantes recabados para el modelado del caso de estudio. Entre ellos, se incluyen:

- Las localizaciones candidatas consideradas por el modelo para la instalación de las plantas finales.
- Las toneladas ofrecidas por cada punto de generación del caso de estudio por período.
- La densidad del residuo generado en cada punto de generación y su densidad luego de aplicar cada tecnología de densificación contemplada en el modelo.
- Los factores de conversión de toneladas a potencial energético para los residuos de cada punto de generación, antes y después de densificar.
- Las distancias máximas de transporte admisibles para los residuos de cada punto de generación, antes y después de densificar.
- La distancia real por carretera entre los puntos de densificación y cada localización candidata de planta final.
- La energía requerida para densificar una tonelada de residuo según cada método de densificación considerado.
- Las capacidades y los costos de inversión, operación y transporte de las plantas de densificación móviles.
- Los costos anuales de inversión fijos y variables, así como los costos de operación, de las plantas de densificación fijas.
- Los costos anuales de inversión fijos y variables, así como los costos de operación, de las plantas finales de valorización energética.
- Los parámetros de capacidad, velocidad y costos asociados a los camiones.
- Otros parámetros complementarios relevantes para el modelo.

## **Anexo VI.**

A continuación, se presenta el relevamiento de los parámetros que requirieron un desarrollo de cálculo adicional, o cuya determinación amerita una explicación más extensa.

### **VI.1. Disponibilidad de biomasa por punto de generación**

La estimación de la biomasa disponible se realizó de manera diferenciada según el tipo de residuo, a partir de fuentes de datos primarias y secundarias. Dichos datos y fuentes se ven reflejados en el [Anexo II](#).

#### **VI.1.1. Cáscara de arroz**

La disponibilidad se estimó a partir de los datos de producción de arroz declarados por cada planta arrocera, que se ven reflejados en el [Anexo II](#). Dado que la cáscara representa aproximadamente el 20% del peso del grano en cáscara, se aplicó dicho factor sobre la producción anual de cada establecimiento para obtener la cantidad de residuo generado.

#### **VI.1.2. Residuos de aserradero**

Los datos de consumo de madera, expresados en m<sup>3</sup>/año, se obtuvieron del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). La fracción de residuos sobre el consumo total de madera aserrada se tomó del trabajo "Biorrefinerías en Uruguay: Evaluación tecno-económica de la producción de combustibles y químicos a partir de materia prima y residuos nacionales". Combinando ambos valores y aplicando una densidad de 0,45 ton/m<sup>3</sup>, se obtuvo la cantidad de residuo disponible en toneladas por aserradero.

#### **VI.1.3. Contenido ruminal**

La disponibilidad de este residuo se estimó a partir del inventario bovino publicado por el Instituto Nacional de Carnes (INAC), considerando un factor de generación de 36 kg de contenido ruminal por cabeza faenada.

### **VI.2. Distancias**

Las distancias entre los puntos de generación de biomasa y las plantas finales fueron relevadas mediante Google Maps. El resto de las distancias del modelo entre puntos de generación y plantas de densificación; entre plantas de densificación y la planta final; y entre dos plantas de densificación móviles, son calculadas directamente por el código de optimización, el cual las estima a partir de la distancia lineal entre coordenadas y les aplica un factor de conversión de 1.3 para obtener una aproximación de la distancia real por carretera, en kilómetros.

### **VI.3. Costos de planta final de valorización energética**

#### **VI.3.1. Costo de operación (OPF)**

El costo de operación de la planta final se estimó tomando como referencia los datos publicados de la planta Galofer, cuya estructura de costos operativos se detalla en la Tabla 8.3. (Martínez, 2018)

*Tabla 8.3. Costo de operación planta final Galofer.*

Concepto	Costo (USD/MWh)
Producción (47% fletes + 32% mano de obra)	68,44
Administración	7,40
Mantenimiento	14,48
Financieros	6,12
Amortizaciones	11,22
<b>Total</b>	<b>107,66</b>

*Fuente: Martínez (2018)*

Para adaptar esta estructura al presente modelo se realizaron dos ajustes. En primer lugar, se excluyó el componente de flete del costo de producción, dado que en el modelo dicho costo es contabilizado de forma explícita como costo logístico. El costo de producción ajustado resulta entonces en USD 36,27/MWh (equivalente al 53% sobre el valor original de producción). En segundo lugar, se excluyó el ítem de amortizaciones, dado que la inversión de capital se contempla de forma separada a través del parámetro IPF. El costo operativo resultante se presenta en la Tabla 8.4.

*Tabla 8.4. Costo de operación planta final*

Concepto	Costo (USD/MWh)
Producción	36,27
Administración	7,40
Mantenimiento	14,48
Financieros	6,12
<b>Total</b>	<b>64,27</b>

Finalmente, a efectos de homogeneizar las unidades con el resto del modelo, este costo se convirtió de USD/MWh a USD/ton de biomasa procesada, utilizando la eficiencia energética de referencia de Galofer de 0,72 MWh/ton:

$$\Rightarrow OPF = 64,27 * 0.72 \Rightarrow OPF = 46,3 \text{ USD/ton}$$

### VI.3.2. Costo de inversión (IPF, IPFF)

Para estimar el costo de inversión de las plantas consideradas en el modelo, se aplicó la Regla de la Potencia 0,6 (*Six-Tenths Rule*), método ampliamente utilizado en ingeniería de procesos para escalar costos de capital entre instalaciones de distinta capacidad.

Para estimar la inversión de la planta final, se tomó como referencia la planta de Galofer, cuyo costo de inversión original fue de USD 28 M en agosto de 2008 (Martínez, 2018). A fin de actualizar este valor a términos corrientes, se empleó el índice CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*), mediante la siguiente expresión:

$$C_{actual} = C_{base} * \frac{CEPCI_{actual}}{CEPCI_{base}}$$

donde  $CEPCI_{base} = 575,4$  (agosto 2008) y  $CEPCI_{actual} = 800$ , lo que resulta en un costo actual de USD 39 M.

A continuación, se escaló dicho valor a la capacidad de la planta proyectada mediante la Regla de la Potencia 0,6:

$$C_2 = C_1 * \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{0.6}$$

Con  $C_1 = \text{USD } 39 \text{ M}$ ,  $Q_1 = 125.000 \text{ tons/año}$  y  $Q_2 = 240.000 \text{ tons/año}$ , se obtiene un costo de inversión estimado de USD 58 M.

Con el objetivo de distinguir, en el modelo de optimización, el costo asociado a la apertura de una nueva planta del costo asociado a su capacidad de procesamiento, se descompone el CAPEX en una función lineal de la forma:

$$CAPEX(Q) = A * Q + b$$

donde A representa el costo variable por tonelada y b un costo fijo de habilitación, independiente de la escala.

Utilizando los dos puntos conocidos:

1.  $CAPEX(125.000) = 39.000.000 \Rightarrow 39.000.000 = 125.000A + b$
2.  $CAPEX(240.000) = 58.000.000 \Rightarrow 58.000.000 = 240.000A + b$

Resolviendo el sistema, se obtiene:

- $A = 165,22 \text{ USD/ton}$
- $b = 18.347.826 \text{ USD}$

Amortizando ambos componentes a 20 años , el costo variable amortizado resulta en 8,261 USD/ton, parámetro que en el modelo se denomina IPF.

El costo fijo amortizado asciende a 917.391 USD/año por planta, equivalente a 76.449 USD/mes por planta, parámetro que en el modelo se denomina IPFF.

De este modo, el costo de inversión en planta final queda caracterizado por dos parámetros diferenciados:

$$\rightarrow IPFF = 76.449 \text{ USD/mes}$$

$$\rightarrow IPF = 8,261 \text{ USD/ton/año}$$

Esta linealización fue necesaria dado que la capacidad de la planta constituye una variable de decisión del modelo, cuyo valor no se conoce a priori. Una vez obtenida la solución óptima, se calculó el error introducido por dicha aproximación, comparando el costo de inversión linealizado con el valor real calculado con la regla de la potencia 0,6 correspondiente a la capacidad óptima resultante. La diferencia obtenida fue de USD 15.602 anuales, equivalente a un costo de inversión subestimado en esa magnitud, lo que representa un error del 0,6% sobre el costo de inversión anual. Este nivel de error se considera aceptable y no afecta la validez de las decisiones adoptadas por el modelo.

## VI.4. Costos de planta de densificación fija

### VI.4.1. Costo de operación (OPD)

El costo operativo de la planta fija se tomó directamente del valor por tonelada procesada publicado por el fabricante en su sitio web, el cual incluye los costos de operación asociados al proceso de peletizado (RICHI Machinery, s. f.). Para las tecnologías de briquetado y triturado, se adoptó el mismo costo operativo.

### VI.4.2. Costo de inversión (IPD, IPDF)

Para la planta de densificación se tomó como referencia una planta comercial de peletizado de cáscara de arroz con capacidad de 30.000 ton/año y un costo de referencia de USD 430.000. (RICHI Machinery, s. f.). Para las tecnologías de briquetado y triturado, se adoptó el mismo costo de inversión.

Aplicando nuevamente la Regla de la Potencia 0,6:

Con  $C_1 = \text{USD } 430 \text{ k}$ ,  $Q_1 = 30.000 \text{ tons/año}$  y  $Q_2 = 200.000 \text{ tons/año}$ , se obtiene un costo de inversión estimado de USD 1.342.000.

Utilizando los dos puntos conocidos:

$$3. \text{ CAPEX}(30.000) = 430.000 \Rightarrow 430.000 = 30.000A + b$$

$$4. \text{ CAPEX}(200.000) = 1.342.000 \Rightarrow 1.342.000 = 200.000A + b$$

Resolviendo el sistema, se obtiene:

$$\circ A = 5,36 \text{ USD/ton}$$

$$\circ b = 269.200 \text{ USD}$$

Amortizando ambos componentes a 10 años acorde con la vida útil estimada de los equipos de densificación:

- El costo variable amortizado resulta en 0,536 USD/ton, parámetro que en el modelo se denomina IPD.
- El costo fijo amortizado asciende a 26,92 kUSD/año por planta, equivalente a 2.243 USD/mes por planta, parámetro que en el modelo se denomina IPDF.

De este modo, el costo de inversión en densificación queda caracterizado por dos parámetros diferenciados:

- $IPDF = 2243 \text{ USD/mes}$
- $IPD = 0.536 \text{ USD/ton/año}$

Esta linealización fue necesaria dado que la capacidad de la planta de densificación constituye una variable de decisión del modelo, cuyo valor no se conoce a priori. Una vez obtenida la solución óptima, se calculó el error introducido por dicha aproximación, comparando el costo de inversión linealizado con el valor real correspondiente a la capacidad óptima resultante. La diferencia obtenida fue de USD 7.785 anuales, equivalente a un costo de inversión subestimado en esa magnitud, lo que representa un error del 9% sobre el costo de inversión anual.

## **VI.5. Costos de planta de densificación móvil**

### **VI.5.1. Costo de inversión (IPD´d)**

Para cada tecnología de densificación móvil se consideró una máquina específica, lo que implica a su vez la necesidad de un vehículo de transporte dedicado para cada una. Los modelos seleccionados fueron el GEMCO MPL 400 para peletizado, la C.F. Nielsen BPU3200 para briquetado y la Crambo e-mobile 4200 para triturado. Los datos de los vehículos fueron provistos mediante consultas a una empresa de transporte referente del rubro (Consulta a empresa del rubro, 2025).

El costo de inversión de cada unidad móvil contempla tanto el precio de la máquina como el del vehículo sobre el que se instala, más los costos asociados al montaje estructural necesario para garantizar su correcta operación en campo. Las máquinas se amortizan a 5 años, acorde a su vida útil esperada, mientras que los vehículos y estructuras de montaje se amortizan a 15 años. A continuación se detalla cada caso:

Peletizadora. La máquina GEMCO MPL 400 tiene un costo de adquisición de USD 30.000, amortizado a 5 años (GEMCO Energy, 2023). El vehículo seleccionado es un camión 6.160 con distancia entre ejes de 3.400 mm, valuado en USD 37.000. Dado que la instalación requiere un montaje estructural adecuado e incorporar patas estabilizadoras para asegurar la estabilidad durante la operación, se estimó un costo adicional de USD 4.500, amortizados ambos a 15 años.

Briquetadora. La C.F. Nielsen BPU3200 tiene un costo de USD 20.000, amortizado a 5 años (C.F. Nielsen, s. f.). El vehículo asignado es un camión 9.180 con distancia entre ejes de 3.400 mm, valuado en USD 45.000, al que se suma un costo estimado de instalación y estabilizadores de USD 4.500, amortizados a 15 años.

Trituradora. La Crambo e-mobile 4200 tiene un costo de USD 55.000, amortizado a 5 años (Komptech, 2024). Dada la mayor envergadura del equipo, se seleccionó un camión 31.330 valuado en USD 100.000, al que se incorpora un sistema hook loader por USD 28.000, amortizados ambos a 15 años.

La inversión total de cada unidad, incluyendo máquina, vehículo y montaje, se resume en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5. Inversión total por máquina

Tecnología	Maquina (USD)	Vehículo + Montaje (USD)	Total (USD)
Peletizadora	30.000	41.500	71.500
Briquetadora	20.000	49.500	69.500
Trituradora	55.000	128.000	183.000

Considerando las amortizaciones mencionadas para cada componente, los cargos anuales de inversión resultantes por tecnología, denominados IPD', son los detallados en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6. Parámetro de inversión densificadora móvil amortizado

Tecnología	IPD' (USD/año)
Peletizadora	8.767
Briquetadora	7.300
Trituradora	19.533

#### VI.5.2. Capacidad de la planta móvil (QDd)

La capacidad operativa de cada tecnología se determinó directamente a partir de las especificaciones técnicas de cada modelo seleccionado. Para el peletizado, la capacidad corresponde a 0,4 ton/h (GEMCO Energy, 2023); para el briquetado, a 0,5 ton/h (C.F. Nielsen, s. f.); y para la trituración, a 55 ton/h (Komptech, 2024).

#### VI.5.3. Costo de transportar planta móvil (C)

El costo de movilización de la planta móvil entre nodos se tomó del trabajo de Albashabsheh et al., "Lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chain optimization with mobile densification and farmers' choices", adoptando un valor de 1,639 USD/milla, equivalente a 1,018 USD/km. Cabe señalar que no se realizan ajustes por posibles diferencias en el precio del combustible entre el país de origen de la referencia y el contexto local.

#### VI.5.4. Costo de Operación (OPD'd)

Para la planta móvil se distinguieron dos procesos con criterios de costeo diferenciados:

Para el peletizado los costos de operación se obtuvieron del informe técnico "Mobile Biomass Pelletizing System" (OSTI, 2011). Dicho documento desglosa los costos unitarios de operación, que se resumen en la Tabla 8.7.

Tabla 8.7. Costo de operación del peletizado móvil

Componente	Costo (USD/ton)
Combustible	18
Mano de obra	16
Setup	1
Seguro	1
Mantenimiento	6
<b>Total</b>	<b>42</b>

Dado que el modelo contempla la inversión de capital por separado, se excluyó del total el componente de amortización incluido en la fuente original, conservando únicamente los costos estrictamente operativos.

Para Briquetado y Triturado se adoptó la misma estructura de costos que para el peletizado, con excepción del costo de energía, que fue recalculado en función de la potencia del motor de cada equipo. Para ello se utilizó la siguiente expresión:

$$C_{energía} \left[ \frac{USD}{ton} \right] = \frac{P_{motor}}{Q} * p_e * f_{USD}$$

donde  $P_{motor}$  es la potencia del motor principal [kW],  $Q$  es la capacidad operativa [ton/h],  $p_e$  es el precio de la electricidad en el año base (USD 0,15/kWh, año 2021) y  $f_{USD}$  es el factor de ajuste de dólar 2021→2025 (1,188).

Aplicando esta expresión, los costos de energía resultantes fueron:

- **Briquetado:**  $\frac{22kW}{0,5 ton/h} * 0,15 * 1,188 = 7,84 USD/ton$
- **Triturado:**  $\frac{160kW}{55 ton/h} * 0,15 * 1,188 = 0,52 USD/ton$

Los costos de operación resultantes para cada tecnología de densificación móvil se resumen a continuación:

- **Peletizado:** 42,00 USD/ton
- **Briquetado:** 31,84 USD/ton
- **Triturado:** 24,52 USD/ton

## VI.6. Camiones

Los datos relativos a la selección y costeo de los vehículos de transporte fueron provistos mediante consulta con una empresa referente del rubro, quien asesoró en la elección del tractor y semirremolque adecuados tanto para el transporte de biomasa como para el traslado de las plantas móviles de densificación.

### **VI.6.1. Costo de compra (CCC)**

Se decidió adquirir un tractor modelo Volkswagen Meteor 28.460 6x2, con un costo de USD 143.000, amortizado a 15 años, junto con un semirremolque Pesco Panther valuado en USD 94.000, amortizado a 10 años. El cargo anual por amortización resulta en USD 18.933/año, considerando USD 9.533/año correspondientes al tractor y USD 9.400/año al semirremolque.

### **VI.6.2. Capacidad de carga (C1, C2)**

La capacidad de carga del conjunto tractor-semirremolque es de 48 toneladas en peso y 96 m<sup>3</sup> en volumen.

### **VI.6.3. Costo de mantenimiento (CM)**

El costo de mantenimiento del conjunto tractor-semirremolque, contemplando servicio y reparaciones, fue estimado en 0,075 USD/km (Consulta a empresa del rubro, 2025).

### **VI.6.4. Costo de combustible (CC)**

El tractor presenta un rendimiento aproximado de 2,8 km/L. Considerando el precio actual del gasoil 50-S de \$UY 37,94/litro (ANCAP, s.f.) y un tipo de cambio de referencia de \$UY 40/USD, se obtiene un costo de combustible de 0,339 USD/km.

### **VI.6.5. Costo del conductor (CD)**

El salario del conductor se estimó en \$UY 700/hora, lo que equivale a USD 17,50/hora al tipo de cambio de referencia utilizado (Consulta a empresa del rubro, 2025).

### **VI.7. Precio de venta de energía**

El precio de venta de energía eléctrica adoptado en el modelo se determinó tomando como referencia el acuerdo celebrado entre la planta Galofer y UTE en el año 2008, en el cual se estableció un precio de USD 77,98/MWh (El País, 2007).

Con el fin de mantener un enfoque conservador, no se asumió ningún incremento real en dicho precio a lo largo del horizonte de evaluación, adaptándose el valor de USD 78/MWh como precio de referencia para el presente análisis.

## Anexo VII.

En la formulación del modelo aparecen términos que resultan del producto entre dos variables de decisión, lo que introduce no linealidades que deben ser reformuladas para mantener la estructura lineal del problema. Para resolverlo, se aplican las envolventes de McCormick, que reemplazan cada producto por una variable auxiliar sujeta a un conjunto de restricciones lineales que reproducen su comportamiento dentro del dominio definido. A continuación se detallan los dos casos presentes en la formulación.

Un primer caso es el producto entre dos variables binarias. Sean  $u, z \in \{0, 1\}$ . El producto  $u * z$  toma el valor 1 únicamente cuando ambas variables son iguales a 1. Se introduce una nueva variable auxiliar  $w = uz$  y se agregan las siguientes restricciones lineales:

$$\begin{aligned}w &\leq u \\w &\leq z \\w &\geq u + z - 1 \\w &\geq 0\end{aligned}$$

Estas restricciones aseguran que  $w = 1$  únicamente cuando  $u = 1$  y  $z = 1$ , y que  $w = 0$  en cualquier otro caso.

Un segundo caso es el producto entre una variable continua y una binaria. Sea  $u$  una variable continua acotada  $0 \leq u \leq M$  y  $z \in \{0, 1\}$ . El producto  $u * z$  toma el valor de  $u$  cuando  $z = 1$  y 0 cuando  $z = 0$ . Se introduce la variable auxiliar  $w = uz$  y se incorporan las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned}w &\leq Mz \\w &\leq u \\w &\geq u - M(1 - z) \\w &\geq 0\end{aligned}$$

El parámetro  $M$  corresponde a una cota superior válida para la variable continua  $u$ . Este conjunto de restricciones garantiza que  $w = u$  cuando  $z = 1$  y  $w = 0$  cuando  $z = 0$ , preservando así la equivalencia con el término bilineal original. (McCormick, 1976)

## Anexo VIII.

Tabla 8.8. Desglose de costos del horizonte de planificación.

Concepto	Monto (USD)	% del total
Operación planta final	9.004.609	45,0%
Adquisición de biomasa	6.004.800	30,0%
Inversión planta final	2.524.020	12,6%
Operación planta densificación	1.986.600	9,9%
Combustible y mantenimiento	238.121	1,2%
Salarios conductores	109.076	0,5%
Inversión planta densificación	87.751	0,4%
Compra de camiones	50.806	0,3%
Total	20.005.783	100%

## Anexo IX.

Se presentan a continuación las tablas correspondientes al análisis de sensibilidad realizado para cada método de densificación considerado en el estudio.

Tabla 8.9. Análisis de sensibilidad para briquetado

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD BRIQUETADO							
Parámetro	-30%	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	+30%
V	919,707	918,145	306,595	-1,596,662	-3,756,907	-5,956,070	-8,234,977
Ef	919,707	918,145	306,595	-1,596,662	-3,913,107	-6,288,319	-7,918,340
Q	-836,000	-1,089,554	-1,343,108	-1,596,662	-1,850,216	-2,103,770	-2,357,324
B	-3,398,102	-2,797,622	-2,197,142	-1,596,662	-996,182	-395,702	172,551
OPF	-4,298,045	-3,397,584	-2,497,123	-1,596,662	-696,201	205,474	791,743
IPF	-2,353,868	-2,101,466	-1,849,064	-1,596,662	-1,343,696	-1,092,480	-839,320
OPD	-2,448,956	-2,098,816	-1,795,322	-1,596,662	-1,398,002	-1,199,342	-1,000,682
IPD	-1,622,987	-1,614,212	-1,605,437	-1,596,662	-1,587,887	-1,579,112	-1,570,337
OPD'	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662
IPD'	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662	-1,596,662

Tabla 8.10. Análisis de sensibilidad para peletizado

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PELETIZADO							
Parámetro	-30%	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	+30%
V	919,707	918,145	306,595	-961,649	-2,444,361	-4,485,776	-6,527,190
Ef	919,707	918,145	306,595	-961,649	-2,593,971	-4,784,996	-6,245,679
Q	-397,938	-585,841	-773,745	-961,649	-1,149,552	-1,337,456	-1,525,360
B	-2,204,386	-1,721,393	-1,341,521	-961,649	-581,777	-201,905	177,967
OPF	-3,104,329	-2,203,868	-1,547,918	-961,649	-375,380	210,890	797,159
IPF	-1,550,677	-1,354,334	-1,157,992	-961,649	-765,306	-568,963	-372,620
OPD	-998,926	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649
IPD	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649
OPD'	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649
IPD'	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649

Tabla 8.11. Análisis de sensibilidad para triturado

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TRITURADO							
Parámetro	-30%	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	+30%
V	919,707	918,145	306,595	-961,649	-2,887,862	-4,986,487	-7,085,112
Ef	919,707	918,145	306,595	-961,649	-2,888,748	-4,988,258	-7,087,768
Q	-397,938	-585,841	-773,745	-961,649	-1,149,552	-1,337,456	-1,525,360
B	-2,590,677	-1,990,197	-1,389,717	-961,649	-581,777	-201,905	177,967
OPF	-3,537,924	-2,621,695	-1,705,466	-961,649	-375,380	210,890	797,159
IPF	-1,753,543	-1,498,328	-1,243,113	-961,649	-765,306	-568,963	-372,620
OPD	-1,385,217	-1,186,557	-987,897	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649
IPD	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649
OPD'	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649
IPD'	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649	-961,649