

Optimization of Forest Biomass Prices and its Impact on the Competitiveness of the Bioenergy Sector

Agustina Anselmino¹, Rodolfo G. Dondo², Mariana E. Cocco¹

¹ Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, FRCU, E3264
Concepción del Uruguay, Argentina

² INTEC (UNL – CONICET), S3000 Santa Fe, Argentina
anselminoagustina@conicet.gov.ar;
rdondo@santafe-conicet.gov.ar;
marcocco@santafe-conicet.gov.ar

Abstract. This paper presents a mixed-integer quadratic programming (MIQP) model with linear constraints, designed to assess how competition among different industries that consume forest biomass affects the price and availability of this resource. The main objective is to analyze the effects of decision variables on the growth and development of the bioenergy market in Argentina. The optimization model is applied to evaluate the forest biomass supply chain in the province of Entre Ríos, where the fiberboard and particleboard industry is the largest consumer of residual biomass, and its production is more profitable than energy generation.

Keywords: optimization, tactical planning, forest biomass, bioenergy, logistics.

Optimización de Precios de la Biomasa Forestal y su Impacto en la Competitividad del Sector Bioenergético

Resumen. Este trabajo presenta un modelo matemático cuadrático entero mixto (MIQP) con restricciones lineales, diseñado para evaluar cómo la competencia entre las distintas industrias que consumen biomasa forestal influye en el precio y la disponibilidad del recurso. El objetivo principal es analizar los efectos de las variables de decisión sobre el crecimiento y desarrollo del mercado de la bioenergía en Argentina. El modelo de optimización se aplica para evaluar la cadena de suministro de la biomasa forestal en la provincia de Entre Ríos, donde la industria de tableros de fibras y partículas es el mayor consumidor de biomasa residual, siendo su producción más rentable que la generación de energía.

Palabras clave: optimización, planificación táctica, biomasa forestal, bioenergía, logística.

Received August 2025; Accepted November 2025; Published February 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

1 Introducción

A nivel global existe una creciente presión por incrementar la participación de energías renovables en las matrices energéticas de los países. Esta tendencia responde a los esfuerzos por mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de combustibles fósiles. En Argentina, se han implementado diversas políticas y convocatorias orientadas a incentivar la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Entre ellas se pueden mencionar a la Convocatoria Abierta Nacional e Internacional “RenMDI” y al Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA).

La región Mesopotámica de Argentina posee condiciones particularmente favorables para el aprovechamiento energético de los residuos foresto-industriales debido a su amplia superficie de plantaciones, principalmente de especies como Eucalyptus y Pino. Además de la reutilización de los subproductos de la industria maderera, que representan más del 60% del volumen de madera procesada en forma primaria, en los últimos años se ha comenzado a explorar el potencial del desarrollo de plantaciones dendroenergéticas destinadas exclusivamente a la producción de biomasa con fines energéticos, utilizando ciclos de rotación más cortos en comparación con los de las plantaciones tradicionales orientadas a la producción de madera aserrable.

En este contexto, el trabajo de Anselmino et al. (2025) presentó un modelo de optimización lineal entero mixto (MILP), con el objetivo de maximizar el Valor Actual Neto (VAN) en un horizonte de planificación de 20 años, evaluando la producción de bioenergía y biocombustibles a partir de biomasa proveniente tanto desde aserraderos como desde plantaciones dendroenergéticas. Para un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos, los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de instalar una planta de cogeneración de bioenergía de 3 MW en el Parque Industrial de Concordia, zona núcleo de la actividad foresto-industrial en la provincia. A partir del estudio, los autores concluyen que el costo de producción de una tonelada de biomasa es el doble del precio al que se pueden obtener los subproductos desde los aserraderos, y que un incremento en el precio de la biomasa residual puede afectar significativamente la rentabilidad del proyecto.

En este sentido, el aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energéticos en Argentina enfrenta importantes desafíos económicos y logísticos. Actualmente, la oferta de biomasa residual tiene un mercado desarrollado en el que la utilización para la producción de energía entraría en competencia por el recurso con otras industrias, como la de celulosa y la de tableros de fibras y partículas, cuya actividad es más rentable que la producción energética. En la práctica, la competencia por la biomasa forestal en nuestro país no se da en condiciones de mercado perfecto. Las industrias de mayor valor agregado tienen mayor poder de negociación respecto de dicho recurso, generando una gran presión sobre los precios que reciben los aserraderos por los subproductos comercializados. Este fenómeno, sumado a la existencia de monopsonios u oligopsonios regionales donde pocos compradores concentran la demanda, condiciona fuertemente la disponibilidad y el precio efectivo del material biomásico para el desarrollo de nuevos proyectos bioenergéticos. La demanda proveniente de diferentes industrias puede generar distorsiones en el mercado de la biomasa, elevando sus precios por encima del punto de rentabilidad de las usinas termoeléctricas (FAO, 2019). Además, el costo del transporte constituye uno de los componentes más significativos en la estructura de costos de los proyectos bioenergéticos. Dado que la biomasa forestal

es un recurso con baja densidad energética, pequeñas variaciones en las distancias o en las tarifas de transporte pueden determinar la viabilidad económica de dichos proyectos. Por ello, resulta crucial la determinación de los límites geográficos de las biocuenas, dentro de las cuales es técnica y económicamente factible transportar la biomasa. En consecuencia, el problema se puede abordar desde un enfoque de planificación táctica con el objetivo de determinar el precio y la disponibilidad de biomasa dentro de cada biocuenca. El análisis se enfoca en minimizar los costos logísticos en la cadena de suministro con el fin de determinar un precio competitivo para el combustible biomásico que permita el desarrollo de proyectos bioenergéticos rentables.

2 Revisión de la bibliografía

La optimización de las cadenas de suministro (CS) de la biomasa forestal es un área de investigación consolidada, reconocida por su papel fundamental en la transición hacia una matriz energética sostenible. La gestión eficiente de dichas cadenas es determinante para la viabilidad de los proyectos de bioenergía, ya que los costos logísticos representan una de las barreras económicas más significativas.

Según Hiloidhari et al. (2023), la generación de bioenergía que sea rentable económicamente requiere de una cadena de suministro eficiente y eficaz, demostrando su ausencia ser una de las principales causas de fracaso de las plantas de bioenergía. Esta razón ha conducido al desarrollo de numerosos modelos de optimización que buscan minimizar el costo operativo total en las cadenas de suministro (CS) de la biomasa, tal como se destaca en las revisiones realizadas por Hmouda et al. (2024), Mottaghi et al. (2022), Visser et al. (2020), Malladi & Sowlati (2018), Yue et al. (2014) y Sharma et al. (2013).

Los modelos publicados en la literatura pueden clasificarse como estratégicos, tácticos u operativos (Chopra, 2018). En las CS de biomasa, la planificación estratégica es de suma importancia para garantizar el suministro de materia prima a largo plazo. Además, los costos logísticos dependen en gran medida de configuraciones específicas de la CS, en particular de la disponibilidad regional de materia prima y de la ubicación de las plantas de conversión (Visser et al., 2020). Una vez determinada la estructura óptima de la CS, se toman decisiones tácticas y operativas para traducir el plan estratégico en acciones concretas mediante una gestión eficiente de los recursos. Según la revisión de la literatura realizada por Sharma et al. (2013), la mayoría de los modelos se centran en decisiones estratégicas relacionadas con el número, la ubicación y la capacidad de los sitios, así como con el diseño de la red de la CS, tales como los trabajos de Cambero et al. (2015), Freppaz et al. (2004), Frombo et al. (2009) y Mohd Yahya et al. (2021). En los otros niveles de planificación, las decisiones tácticas y operativas suelen estar vinculadas al flujo de materiales y a la gestión de inventarios y de flotas, entre los que se pueden mencionar a Campanella et al. (2018), Shabani & Sowlati (2013), y Vitale et al. (2022). Asimismo, algunos estudios han abordado simultáneamente decisiones estratégicas y tácticas, como los realizados por Akhtari et al. (2022) y Memişoğlu & Üster (2016).

A pesar de la extensa producción científica, la revisión evidencia algunas brechas significativas que justifican nuevos enfoques de modelado. En primer lugar, la mayoría de los enfoques de optimización se centran en la CS de una única industria y asumen precios y disponibilidades fijas y conocidas. Sin embargo, en contextos reales el precio

mínimo que pretenden los aserraderos por los subproductos comercializados suele superar al máximo que la industria energética puede pagar sin subsidios (Olemborg & Lupi, 2024). También debe considerarse la competencia por el recurso con otras industrias de mayor valor agregado, como las de celulosa o de tableros de fibras y partículas, que poseen mayor poder de negociación y de compra. Por otra parte, las CS de biomasa presentan múltiples fuentes de incertidumbre internas y externas. Factores como la variabilidad climática afectan la calidad y disponibilidad de la materia prima, mientras que las fluctuaciones de mercado impactan en su demanda y precios. Aunque se han desarrollado modelos robustos y estocásticos para incorporar incertidumbre en la planificación táctica y estratégica (Saghaei et al., 2020), la mayoría se limita a escenarios de oferta y demanda sin integrar incertidumbre en la formación de precios ni en la competencia entre industrias. Finalmente, aunque la sostenibilidad es un objetivo recurrente, los modelos de CS suelen priorizar criterios económicos y ambientales, relegando aspectos sociales y la integración de la economía circular. Manrique et al. (2023) subrayan la importancia del “uso en cascada” de la biomasa, priorizando productos de mayor valor antes de destinar los residuos a la bioenergía, e integrando indicadores sociales y de generación de empleo en la optimización.

En síntesis, la literatura evidencia la falta de modelos que integren explícitamente la competencia entre industrias, la formación endógena de precios y la incertidumbre en la disponibilidad y la demanda de biomasa bajo un enfoque de sostenibilidad que implique a todos los actores de la CS. El modelo MIQP propuesto en este trabajo abordará estas limitaciones al representar la dinámica competitiva en diferentes biocuentas, permitiendo estimar precios de equilibrio y flujos óptimos de biomasa, con el objetivo de avanzar hacia cadenas de suministro forestales más resilientes, eficientes y sostenibles.

3 Definición del problema

El problema de planificación táctica abordado considera una cadena de suministro que incluye al conjunto de ubicaciones $I = \{I^+ \cup I^-\}$, siendo I^+ el conjunto de nodos fuente (representando a los proveedores que comercializan biomasa forestal en sus diferentes formas) e I^- el conjunto de nodos consumidores de dicho recurso, los que pueden requerir del recurso para la producción de bioenergía (I^B) o para su transformación en otros tipos de productos (I^P), siendo $I^- = \{I^B \cup I^P\}$. La Figura 1 esquematiza la estructura de la cadena de suministro considerada en este estudio, donde varios tipos de industrias con diferente valor agregado compiten por el mismo tipo de materia prima, la biomasa de origen forestal.

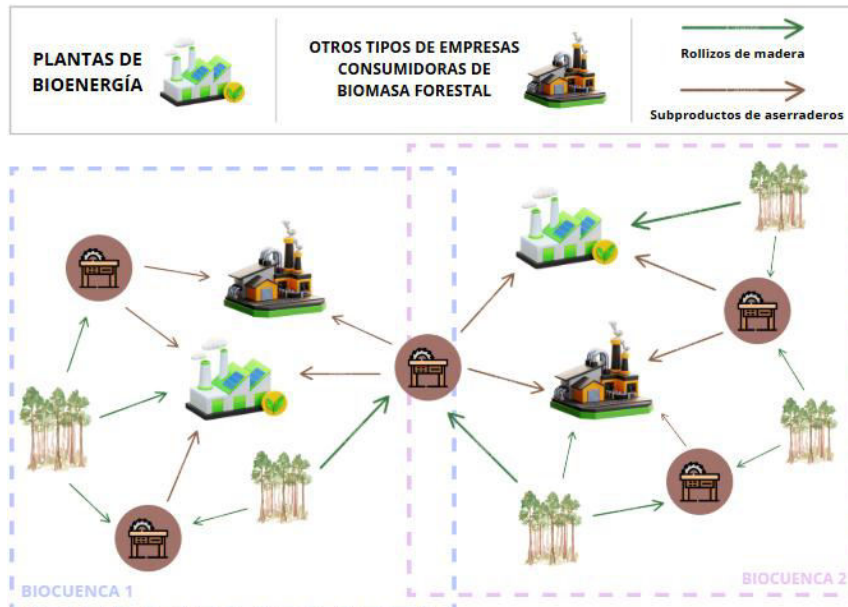


Fig. 1. Estructura de la cadena de suministro.

Cada proveedor $i \in I^+$ puede suministrar diferentes tipos de biomasa, tales como chips, aserrín, y madera en rollo, considerando además diferentes porcentajes de humedad. En la práctica, el contenido de humedad es extremadamente importante para no dañar las calderas, las cuales, dependiendo de su tecnología, tienen capacidad para aceptar un menor o mayor contenido. Por ese motivo, tanto en los acuerdos verbales como en los contratos formales, la humedad de la biomasa es un aspecto clave que compromete el precio final que el consumidor está dispuesto a pagar por la materia prima. El contenido de humedad es considerado el atributo de calidad más importante de la biomasa entregada a las plantas generadoras de bioenergía. Esta importancia se traduce directamente en el valor económico del producto, ya que un mayor contenido de humedad implica un menor valor energético neto y puede generar descuentos de precio de hasta un 14% por tonelada seca (Acuna et al., 2019). Los diferentes tipos de biomasa disponible, diferenciadas por su contenido de humedad, se agrupan en el conjunto K . Para cada mes del horizonte de planificación $t \in T$, el parámetro $a_{i,k,t}$ determina la cantidad de biomasa $k \in K$ disponible en cada proveedor $i \in I^+$. Otra restricción operativa importante para el funcionamiento de las calderas en cada nodo $i \in I^B$ se relaciona con el porcentaje de finos (incluyendo el aserrín) que puede contener la biomasa entrante, aceptando en las mejores condiciones hasta un 30%. Dicho porcentaje se representa a través del parámetro $wcp_{w,i}$, donde $w \in W$ incluye únicamente los tipos de biomasa, por ejemplo $W = \{chip, aserrin\}$, sin diferenciar su porcentaje de humedad como lo hace el conjunto K , por ejemplo $K = \{chip_{30}, chip_{40}, aserrin_{40}\}$.

Uno de los principales desafíos del mercado de la biomasa es definir el precio adecuado de venta para cada proveedor, teniendo en cuenta el precio mínimo publicado

periódicamente por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y el precio en planta que están dispuestos a pagar los consumidores del recurso $i \in I^-$. Ambos precios se representan a través de los parámetros $pb_{k,t}^{INTA}$ y $pb_{i,k,t}$, respectivamente. El precio final que reciba cada proveedor $i \in I^+$, se considera como variable de decisión ($P_{i,k,t}$), y su valor dependerá de la disponibilidad de biomasa en la zona, de la distancia entre proveedor y consumidor, y de los contratos previos que las empresas consumidoras puedan tener con los proveedores de la materia prima. La distancia entre los nodos de la red se representa mediante el parámetro $d_{i,i'}$, con $i \in I^+$ e $i' \in I^-$. La existencia de un contrato entre un proveedor i y un consumidor i' se establece a través del parámetro $c_{i,i',k,t}$ que determina la cantidad mínima de biomasa k a ser suministrada en el periodo t .

El movimiento de la biomasa desde los puntos de suministro hacia los consumidores se realiza mediante camiones, cuyo costo de operación se establece en toneladas por kilómetro. Específicamente, el parámetro $tc_{k,t}$ contabiliza el costo de transportar una tonelada de producto tipo k a lo largo de un kilómetro durante el periodo t . El costo de transporte suele representar un porcentaje elevado del precio final del recurso puesto en planta.

Cada nodo consumidor $i \in I^P$ demanda una cantidad $dem_{i,t}$ de biomasa en cada periodo de tiempo $t \in T$. En el caso de la producción de bioenergía, las plantas $i \in I^B$ pueden ajustar la producción de acuerdo con el volumen de combustible de entrada recibido, debiendo cumplir siempre con el factor de utilización mínimo uf_i de la capacidad instalada cap_i . Se contempla una penalidad con costo asociado $pen_{i,t}$ cuando no se satisfaga la demanda de algún nodo consumidor $i \in I^-$ en algún periodo de tiempo $t \in T$.

El problema asume que todas plantas cuentan con capacidad para chipear, es decir convertir en chips de material celulósico la madera en rollo, con un costo asociado $ccp_{i,k,t}$ en caso de que fuere conveniente adquirirla. Por otra parte, algunos sistemas de conversión requieren de un proceso de secado previo de la biomasa entrante para reducir su contenido de humedad hasta un 30% - 50% en base húmeda (para la producción de bioenergía) o 12% (para la producción de pellets). La etapa de secado involucra la evaporación del agua contenida en el recurso. El contenido de humedad entrante de la biomasa tipo k y el umbral requerido por la instalación i determinan, a través del parámetro $dr_{k,i}$, la cantidad de agua a evaporar durante el proceso de secado.

Para su conversión en energía, es necesario conocer a priori el poder calorífico inferior (PCI) de cada tipo de biomasa k según el contenido de humedad aceptado por la tecnología de conversión instalada en cada planta $i \in I^B$. La cantidad de energía eléctrica que pueda entregar una planta en cada periodo del horizonte de planificación estará determinada por la capacidad operativa máxima cap_i , su eficiencia de conversión ϕ_i , y el volumen de combustible de entrada procesado.

Todos los nodos consumidores cuentan con la infraestructura necesaria para operar y gestionar el almacenamiento de la biomasa entrante, el cual tendrá límites en su capacidad $[i_{i,k,t}^{min}, i_{i,k,t}^{max}]$, y deberá asegurar que el recurso se encuentre en buenas condiciones para no dañar los equipos y poder aprovechar al máximo su potencial energético. Al comienzo del horizonte de planificación, se asume que cada planta $i \in I^-$ cuenta con un inventario inicial de biomasa, dado por el parámetro $i_{i,k}^0$. Las condiciones de almacenamiento tienen un papel preponderante en el contenido de

humedad del recurso biomásico, dado que es diferente disponerlo a cielo abierto (donde adquiere fácilmente humedad del ambiente) que ubicarlo en lugares techados, cerrados y/o en silos. Esto ocurre porque la madera es un material higroscópico, es decir que tiene la capacidad de absorber y retener humedad del medio en el que se encuentra.

La solución al problema descripto tiene como objetivo determinar, para cada mes $t \in T$ del horizonte de planificación, las siguientes decisiones: (i) El precio de venta de cada tipo de biomasa en cada proveedor, $P_{i,k,t}$, (ii) La cantidad de biomasa transportada entre los nodos de la red, $Q_{i,i',k,t}$, (iii) Las existencias en inventario en cada planta al finalizar el periodo, $I_{i',k,t}$, (iv) La cantidad de biomasa utilizada por cada planta en operación, $C_{i',k,t}$, (v) La demanda insatisfecha en cada nodo de consumo, $UD_{i',t}$, (vi) La cantidad de energía térmica utilizada en cada planta durante el proceso de secado, $H_{i',t}$.

4 Formulación Matemática

Dada la caracterización de la cadena de suministro y de las condiciones de mercado expuestas en la sección anterior, es posible formalizar matemáticamente el problema descripto a partir de los conjuntos, parámetros y variables que se detallan en la Tabla 1.

Tabla. 1. Nomenclatura.

CONJUNTOS	
I	Instalaciones en la cadena de suministro
I^+	Nodos de suministro ($I^+ \subset I$)
I^-	Nodos de consumo ($I^- \subset I$)
I^B	Plantas de bioenergía ($I^B \subset I^-$)
I^P	Otras industrias consumidoras de biomasa forestal ($I^P \subset I^-$)
K	Tipos de biomasa diferenciadas por su contenido de humedad
W	Tipos de biomasa sin diferenciar por su contenido de humedad
T	Periodos de tiempo [<i>meses</i>]
PARÁMETROS	
$a_{i,k,t}$	Cantidad total disponible en el proveedor i de biomasa tipo k durante el periodo t [<i>ton</i>]
$c_{i,i',k,t}$	Cantidad de venta definida por contrato entre el proveedor i y el consumidor i' de biomasa tipo k en periodo t [<i>ton</i>]
cap_i	Capacidad de generación de energía instalada en la planta i [<i>MW</i>]
$ccp_{i,k,t}$	Costo en el que incurre la planta i para chipear biomasa tipo k en el periodo t [<i>USD/ton</i>]
$ch_{i,t}$	Costo unitario de la energía térmica en la planta i durante el periodo t [<i>USD/MWh</i>]

$ci_{i,k,t}$	Costo de inventario en la planta i por tonelada de biomasa tipo k durante el periodo t [USD/ton]
$d_{i,i'}$	Distancia entre dos ubicaciones i, i' [km]
$dem_{i,t}$	Demanda total de biomasa en cada industria i durante el periodo t [ton]
$dr_{k,i}$	Porcentaje de agua a evaporar de la biomasa tipo k para alcanzar el umbral de humedad exigido por la planta i [%]
$i_{i,k}^0$	Inventario inicial o preexistente en la planta i de tipo de biomasa k [ton]
$i_{i,k,t}^{min}$	Stock de seguridad requerido en la planta i de tipo de biomasa k durante el periodo t [ton]
$i_{i,k,t}^{max}$	Capacidad máxima de almacenamiento en la planta i del tipo de biomasa k durante el periodo t [ton]
$lhv_{i,k}$	Poder calorífico inferior de la biomasa tipo k al contenido de humedad requerido en la planta i [GJ/ton]
na_i	Cantidad mínima de materia prima requerida por la planta i al finalizar el horizonte de planificación [ton]
$pb_{i,k,t}$	Precio que la planta i está dispuesta a pagar por tonelada de biomasa tipo k en el periodo t [USD/ton]
$pb_{k,t}^{INTA}$	Precio de mercado por tonelada de biomasa tipo k en el periodo t [USD/ton]
$pen_{i,t}$	Costo por demanda insatisfecha en la planta i durante el periodo t [USD/ton]
$pen_{i,t}^T$	Costo por no cumplir con los requerimientos de inventario en la planta i en el periodo t [USD/ton]
$tc_{k,t}$	Costo unitario de transporte de biomasa tipo k durante el periodo t [$USD/km.ton$]
tr^{max}	Tiempo máximo de almacenamiento [$meses$]
uf_i	Tasa mínima de utilización de la tecnología instalada en la planta i [%]
$wcp_{w,i}$	Porcentaje mínimo exigido de chip para el funcionamiento de las calderas en la planta i [%]
η_i^h	Consumo de energía térmica por tonelada de agua evaporada en la planta i [$MWh/tonelada\ de\ agua\ evaporada$]
ρ	Factor de conversión de MWh a GJ
ϕ_i	Eficiencia de conversión de la tecnología instalada en la planta de bioenergía i
π_i	Cantidad de horas que una planta de bioenergía i puede estar operativa durante cada periodo

α_i	Factor de disponibilidad de la tecnología de conversión instalada en la planta i
VARIABLES BINARIAS	
$Z_{i,i',k,t}$	Define si un proveedor i vende al consumidor i' biomasa forestal tipo k en el periodo t
VARIABLES CONTINUAS	
$C_{i,k,t}$	Consumo efectivo en la planta i de biomasa tipo k durante el periodo t [ton]
$H_{i,t}$	Cantidad de energía térmica utilizada en la planta i durante el periodo t [MWh]
$I_{i,k,t}$	Cantidad de inventario en cada planta i de biomasa tipo k al finalizar el periodo t [ton]
$IN_{i,t}$	Cantidad total de energía que ingresa al proceso de conversión en la planta i durante el periodo t [MWh]
$L_{i,k,t}$	Cantidad total de biomasa tipo k que se pierde en la planta i hasta el periodo t por no haber sido utilizada dentro del plazo límite de tiempo en el cual el material mantiene las cualidades técnicas adecuadas [ton]
$P_{i,k,t}$	Precio que recibe el proveedor i por la biomasa tipo k en el periodo t [USD/ton]
$Q_{i,i',k,t}$	Cantidad suministrada desde el proveedor i al consumidor i' de biomasa tipo k durante el periodo t [ton]
$UD_{i,t}$	Demanda insatisfecha de materia prima en la planta i durante el periodo t [ton]
$UD_{i,t}^T$	Inventario insatisfecho de materia prima en la planta i durante el periodo t [ton]

En la formulación matemática, se usan letras minúsculas para indicar parámetros del modelo y letras mayúsculas para las variables de decisión. El problema se representa matemáticamente mediante un enfoque de programación entera mixta, con función objetivo cuadrática y restricciones lineales. Tanto el precio de venta $P_{i,k,t}$ de la biomasa tipo k por parte del proveedor $i \in I^+$ en el periodo t , como la cantidad suministrada $Q_{i,i',k,t}$ a cada nodo consumidor $i' \in I^-$, se definen como variables de decisión en el problema de optimización. El término cuadrático surge a partir del producto entre ambas variables continuas. Además, se utiliza la variable binaria $Z_{i,i',k,t}$ para indicar el suministro de biomasa tipo k desde el proveedor i al consumidor i' durante el periodo de tiempo $t \in T$. Las restricciones del problema se agrupan según su tipo en los siguientes bloques:

Función objetivo. Se busca minimizar los costos asociados a los siguientes conceptos: (i) compra de materia prima (ii) transporte de la biomasa desde los proveedores hacia las plantas; (iii) “chiqueo” de madera en rollo (iv) almacenamiento en

planta (v) consumo de energía térmica utilizada para en el proceso de secado; (vi) penalidad por demanda insatisfecha y (vii) penalidad por no cumplir los requerimientos de inventario al final del horizonte de planificación.

$$\begin{aligned}
 \min TC = & \sum_{i \in I^+} \sum_{i' \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} P_{i,k,t} \times Q_{i,i',k,t} + \sum_{i \in I^+} \sum_{i' \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} tc_{k,t} \times d_{i,i'} \times Q_{i,i',k,t} \\
 & + \sum_{i \in I^+} \sum_{i' \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} ccp_{i',k,t} \times Q_{i,i',k,t} + \sum_{i \in I^-} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} ci_{i,k,t} \times I_{i,k,t} \\
 & + \sum_{i \in I^-} \sum_{t \in T} ch_{i,t} \times H_{i,t} + \sum_{i \in I^-} \sum_{t \in T} pen_{i,t} \times UD_{i,t} \\
 & + \sum_{i \in I^-} \sum_{t \in T} pen_{i,t}^T \times UD_{i,t}^T
 \end{aligned} \tag{1}$$

Disponibilidad y precio de la biomasa. En el mercado de la biomasa suelen formarse monopsonios regionales, donde algunas grandes empresas $i' \in I^-$ consumidoras del recurso establecen los precios máximos por tonelada de materia prima puesta en fábrica, dato conocido a través del parámetro $pb_{i',k,t}$. De esta manera, como establece la restricción (2), el valor $P_{i,k,t}$ que recibe cada proveedor dependerá de los nodos de consumo a los que entregue y de la distancia de estos al punto de suministro. A su vez, la restricción (3) impone el precio mínimo de venta $pb_{k,t}^{INTA}$ por tonelada de cada tipo de biomasa k , de acuerdo con los valores de mercado publicados periódicamente por el INTA.

$$P_{i,k,t} \geq (pb_{i',k,t} - tc_{k,t} \times d_{i,i'}) \times Z_{i,i',k,t} \quad \forall i \in I^+, i' \in I^-, k \in K, t \in T \tag{2}$$

$$P_{i,k,t} \geq pb_{k,t}^{INTA} \quad \forall i \in I^+, k \in K, t \in T \tag{3}$$

La restricción (4) fuerza a que la cantidad de biomasa tipo k a ser entregada desde el proveedor $i \in I^+$ a un consumidor $i' \in I^-$ en el periodo t sea mayor o igual a la cantidad definida por el contrato $c_{i,i',k,t}$, si existiese acuerdo entre ambos actores, y menor o igual a la cantidad total disponible en el proveedor para su venta $a_{i,k,t}$, siempre que $Z_{i,i',k,t} = 1$. Además, la cantidad de biomasa tipo k entregada por cada proveedor $i \in I^+$ a todos los destinos consumidores $i' \in I^-$ no puede ser mayor a la disponibilidad en cada periodo, como lo determina la restricción (5).

$$c_{i,i',k,t} \leq Q_{i,i',k,t} \leq a_{i,k,t} \times Z_{i,i',k,t} \quad \forall i \in I^+, i' \in I^-, k \in K, t \in T \tag{4}$$

$$\sum_{i' \in I^-} Q_{i,i',k,t} \leq a_{i,k,t} \quad \forall i \in I^+, k \in K, t \in T \tag{5}$$

Almacenamiento de la biomasa. La restricción (6) contabiliza el inventario de cada tipo de biomasa en cada nodo consumidor al finalizar un periodo de tiempo. El consumo efectivo de biomasa tipo k en una planta i durante el periodo t se define por la variable continua $C_{i,k,t}$. Además, se utiliza otra variable continua, $L_{i,k,t}$, para indicar la cantidad

acumulada de biomasa que se pierde hasta el periodo t por no haber sido utilizada dentro del plazo límite de tiempo en el cual el material mantiene las cualidades técnicas necesarias para su uso en el proceso. Por otra parte, la restricción (7) establece un requerimiento mínimo en inventario (stock de seguridad) $i_{i,k,t}^{min}$ y una capacidad limitada de almacenamiento $i_{i,k,t}^{max}$. Finalmente, la restricción (8) obliga a que la cantidad total de biomasa en inventario al finalizar el horizonte de planificación, sea mayor o igual a un valor preestablecido na_i . En caso de no alcanzar dicho requerimiento mínimo, la variable $UD_{i,t}^T$ contabiliza la cantidad faltante.

$$I_{i,k,t} = i_{i,k}^0 + \sum_{i' \in I^+} \sum_{t' \leq t} Q_{i',i,k,t'} - \sum_{t' \leq t} C_{i,k,t'} - L_{i,k,t} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T \quad (6)$$

$$i_{i,k,t}^{min} \leq I_{i,k,t} \leq i_{i,k,t}^{max} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} I_{i,k,t} + UD_{i,t}^T \geq na_i \quad \forall i \in I^-, t \in T: t = |T| \quad (8)$$

Las restricciones (9) y (10) se utilizan para determinar la cantidad de biomasa en almacenamiento que tiene que ser descartada por haber superado el tiempo máximo de almacenamiento tr^{max} . Como se mencionó anteriormente, desde que la biomasa se recibe en la planta, se establece un número máximo de periodos de tiempo para su utilización. Esto se debe a que un almacenamiento prolongado puede causar algunos problemas, tales como la generación de hongos. La variable $L_{i,k,t}$ determina la cantidad acumulada de biomasa tipo k descartada en la planta i hasta el periodo t .

$$L_{i,k,t} \geq \sum_{t' \in T: t' \leq t - tr^{max}} \sum_{i' \in I^+} Q_{i',i,k,t'} - \sum_{t' \in T: t' < t} C_{i,k,t'} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T: t > tr^{max} \quad (9)$$

$$L_{i,k,t} \geq L_{i,k,t-1} \quad \forall i \in I^-, k \in K, t \in T: t > tr^{max} + 1 \quad (10)$$

Consumo de biomasa en las industrias. Debido a las configuraciones de diseño de los procesos de producción en cada planta $i \in I^-$, es necesario establecer un máximo porcentaje de biomasa de tipo $w \in W$ que puede ser utilizada en cada periodo, como lo establece la restricción (11). Como se explicó anteriormente, el conjunto W incluye únicamente los tipos de biomasa sin considerar su porcentaje de humedad.

$$wcp_{w,i} \times \left(\sum_{k \in K} C_{i,k,t} \right) \geq \sum_{k \in K_w} C_{i,k,t} \quad \forall i \in I^-, w \in W, t \in T \quad (11)$$

El contenido de humedad de la biomasa usada como combustible en las calderas suele ser un factor importante para el buen funcionamiento de los equipos. Además, otros procesos, como por ejemplo la producción de pellets, requieren llevar la humedad de la materia prima a umbrales mínimos. Cuando la humedad del material está por encima de los requerimientos técnicos de la tecnología usada en una determinada instalación, es necesario someter la materia prima a un proceso de secado, siendo el parámetro $dr_{k,i}$ aquel que especifica qué porcentaje de agua hay que evaporar de la biomasa tipo k para alcanzar el umbral de humedad exigido por la tecnología instalada.

en la planta i . La restricción (12) determina el consumo de energía térmica en una instalación durante cada periodo, considerando el consumo específico de calor η_i^h por tonelada de agua evaporada.

$$H_{i,t} = \eta_i^h \times \sum_{k \in K} (C_{i,k,t} \times (1 - dr_{k,i})) \quad \forall i \in I^-, t \in T \quad (12)$$

Para las plantas $i \in I^B$ que producen bioenergía, la restricción (13) determina, a través de la variable continua $IN_{i,t}$, la cantidad total de energía de entrada (en MWh) al proceso de conversión. Para dicho cálculo se consideran: las toneladas de biomasa resultante después del proceso de secado, su poder calorífico inferior $lhv_{k,i}$ (GJ/ton) y el factor de conversión ρ (MWh/GJ).

$$IN_{i,t} = \sum_{k \in K} (C_{i,k,t} \times dr_{k,i} \times lhv_{k,i} \times \rho) \quad \forall i \in I^B, t \in T \quad (13)$$

Finalmente, la eficiencia de conversión ϕ_i de la tecnología instalada en cada planta $i \in I^B$, determina cuánta energía eléctrica se produce en cada periodo de tiempo, como se especifica en la restricción (14). Se deben cumplir con las capacidades operativas mínimas y máximas. La capacidad operativa mínima se define mediante el producto entre el parámetro uf_i , que determina la tasa mínima de utilización, el parámetro cap_i que indica la capacidad instalada de la planta, y el parámetro $\pi_i = 30 * 24 * \alpha_i$, que representa la cantidad de horas que una determinada planta i puede estar operativa durante un periodo, siendo el factor de disponibilidad α_i el porcentaje de tiempo que el sistema está disponible para operar considerando las actividades de mantenimiento preventivo y/o correctivo. Por otro lado, la capacidad operativa máxima se define como la multiplicación entre la capacidad instalada cap_i y el parámetro π_i . Cuando exista demanda insatisfecha de biomasa en algún periodo de tiempo, la producción de la planta no podrá alcanzar los niveles mínimos requeridos y, por lo tanto, la variable $UD_{i,t}$ será obligada a tomar un valor mayor a cero. Para las plantas de bioenergía $i \in I^B$, la demanda insatisfecha se mide en MWh , indicando la cantidad de energía eléctrica que no pudo ser generada debido a la falta de material combustible.

$$(uf_i \times cap_i \times \pi_i) - UD_{i,t} \leq IN_{i,t} \times \phi_i \leq cap_i \times \pi_i \quad \forall i \in I^B, t \in T \quad (14)$$

Para los otros tipos de industrias consumidoras de biomasa $i \in I^P$, la demanda insatisfecha se mide en toneladas y se calcula como la diferencia entre la demanda total de biomasa al umbral de humedad requerido $dem_{i,t}$ y la cantidad de materia prima consumida en dicho periodo, como se especifica en la restricción (15).

$$dem_{i,t} = \sum_{k \in K} C_{i,k,t} \times dr_{k,i} + UD_{i,t} \quad \forall i \in I^P, t \in T \quad (15)$$

5 Caso de Estudio y Resultados

Para evaluar la potencialidad del modelo propuesto, se plantea un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos. Como se muestra en el mapa de la Figura 2, existen 2 grandes

empresas consumidoras de biomasa ubicadas en los departamentos de Concepción del Uruguay (PM1) y Concordia (PM3), las cuales se especializan en la producción de tableros de fibras y partículas, con una demanda promedio de 5.000 toneladas mensuales de biomasa cada una (ver Tabla 1). Además, se identifican otros dos nodos de consumo: la ubicación PM2 que referencia una fábrica de pellets con capacidad de producción de 2 ton/hora y un consumo promedio mensual de biomasa seca de 800 toneladas, y el nodo BP1, que determina la ubicación de una usina termoeléctrica con capacidad de 3 MW y un consumo promedio de 2,2 toneladas de biomasa por MWh generado, proyecto que fue licitado en la última convocatoria del RenMDI para su instalación en la ciudad de Ubajay.

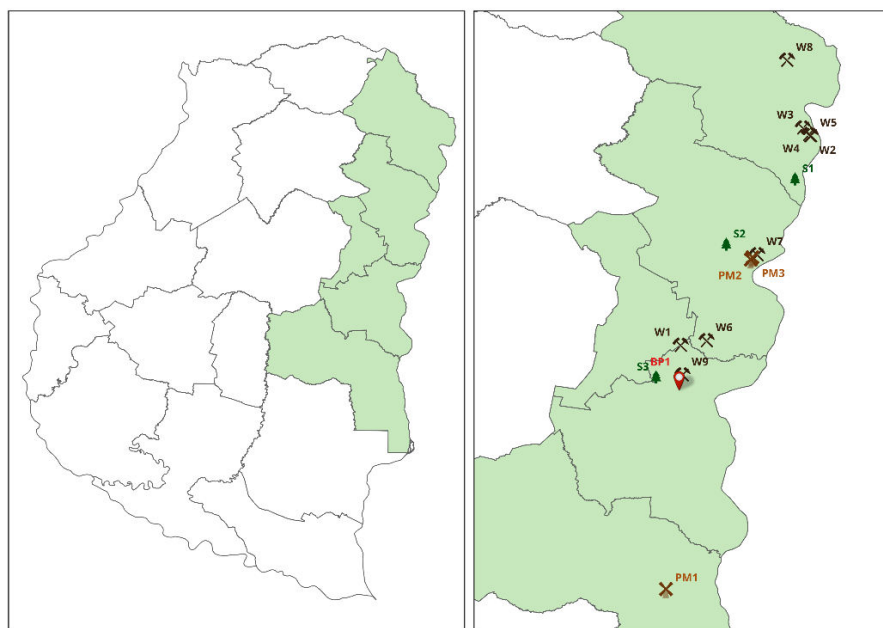


Fig. 2. Actores de la cadena de suministros (W = Aserraderos, S = Rodales forestales, PM = Plantas consumidoras de biomasa, BP = Usina termoeléctrica).

Respecto de la disponibilidad del recurso, la provincia de Entre Ríos cuenta con una gran cantidad y variedad de biomasa forestal, con accesibilidad continua durante todo el año, y que se puede almacenar a la intemperie, transportar y “chipear” fácilmente. Como se resalta en el lado derecho de la Figura 2, el principal polo maderero de la provincia se ubica sobre la costa del Río Uruguay, en los departamentos de Federación, Concordia y Colón. En la zona funcionan más de 200 aserraderos, que trabajan con promedios de rendimientos menores al 50%, es decir que por cada metro cúbico de rollos que ingresan a esta industria, se producen menos de medio metro cúbico de tablas, y más de la mitad se transforma en subproductos (aserrín, costaneros, despuntes, etc.). Mediante el uso del sistema de información geográfica QGIS, se identifican 3 rodales forestales para la producción de biomasa con un tamaño de entre 20 y 30 hectáreas, de la especie *Eucalyptus Grandis*. Respecto de los aserraderos, se seleccionan

9 ubicaciones, capaces de suministrar biomasa residual, principalmente aserrín y chips de madera, con diferentes contenidos de humedad. La oferta y demanda mensual promedio de biomasa en cada nodo de la red de suministro se detalla en la Tabla 2.

Tabla. 2. Oferta y Demanda de Biomasa en cada Nodo de la Red

Proveedores	Oferta Promedio Mensual (ton)	Plantas	Demanda Promedio Mensual (ton)
W1	2146	BP1 (3 MW)	Aprox. 2,2 por MWh
W2	2265		
W3	1865	PM1 (Fábrica de Tableros)	5200
W4	1816	PM2 (Fábrica de Pellets)	768 (12% de Contenido de humedad en base húmeda)
W5	1798		
W6	1762	PM3 (Fábrica de Tableros)	4200
W7	30		
W8	64		
W9	1586		
S1	256		
S2	274		
S3	286		

Los precios de referencia mínimos para la compra de los subproductos son publicados periódicamente por el INTA Concordia (INTA, 2024), quién también provee información sobre los precios de los productos forestales puestos en planta que pagan las empresas consumidoras de la región. Para determinar el precio máximo que podría llegar a pagar la planta de bioenergía por cada tonelada de biomasa, se toman como referencia los resultados del estudio desarrollado por Olemberg y Lupi (2024), considerando un precio subsidiado de la bioenergía de $130 \left[\frac{USD}{MWh} \right]$.

El transporte del material desde los puntos de suministro hacia los consumidores se realiza utilizando un servicio de transporte tercerizado. La costa del Río Uruguay posee una densa red de infraestructura vial pavimentada con niveles de accesibilidad a las potenciales fuentes de suministro de biomasa por encima del 70%. Los costos de transporte rondan aproximadamente entre 0.12 y $0.15 \left[\frac{USD}{ton.km} \right]$, dependiendo del tipo de material transportado. La biomasa es clasificada por su contenido de humedad, característica que, si bien no resulta importante para la fabricación de tableros, si es relevante para la producción de pellets y bioenergía, con umbrales máximos de humedad del 12% y 50%, respectivamente. En caso de no cumplir con dicho requerimiento, el material debe pasar por un proceso de secado que tiene un consumo de energía térmica asociado de 1200 kWh por tonelada de agua evaporada. Además, se considera un costo de “chipeado” de $0.0436 \left[\frac{USD}{ton} \right]$ para la madera en rollo.

Las especificaciones técnicas del equipamiento utilizado en algunos procesos determinan un máximo en la utilización de aserrín, siendo del 20% para la producción de tableros y 30% en las calderas de combustión a biomasa.

Respecto al funcionamiento de la planta de bioenergía, se considera un factor de disponibilidad del 91% y una operación de 24 horas diarias. Además, se impone un mínimo de 41% al uso de la capacidad operativa de 3 MW instalada, con una eficiencia de conversión del 15%.

En principio, se considera que no existen contratos con los proveedores que aseguren el aprovisionamiento de materia prima a las empresas, y que las capacidades de almacenamiento en los nodos de consumo son las suficientes para mantener una operación continua de las plantas.

El algoritmo fue desarrollado en Python utilizando la librería Pyomo, y ejecutado en una PC con 16 GB de RAM y 8 núcleos con 16 hilos a 2.1 GHz, utilizando GUROBI como resolutor MIP. Considerando un horizonte de planificación de 12 meses, se obtiene una solución óptima con mínimo costo operacional de 3.337.594 USD en 332 segundos de cómputo. Los resultados obtenidos no muestran demanda insatisfecha en ninguno de los nodos consumidores. El flujo óptimo de biomasa desde los puntos de suministro hasta las plantas se ilustra en la Figura 3.

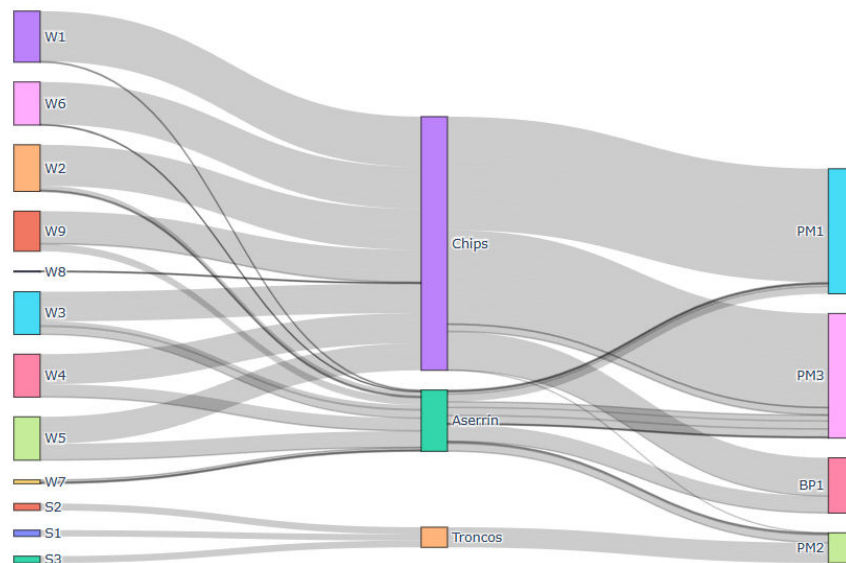


Fig. 3. Dimensión del flujo de cada tipo de biomasa desde los proveedores hacia los consumidores (W = Aserraderos, S = Rodales forestales, PM1, PM3 = Fábricas de Tableros, PM2 = Fábrica de Pellets, BP1 = Planta de Bioenergía).

Desde un enfoque de cadena de suministro colaborativa, dónde la función objetivo busca minimizar los costos operativos totales, la solución óptima del problema sugiere que la biomasa producida en el rodal S1 se envíe a la planta PM2 en vez de hacerlo al nodo de consumo más cercano BP1. Esto se debe a que el precio que puede pagar la planta de bioenergía por el recurso es mayor al valor ofertado por la empresa productora de pellets. La Tabla 3 detalla que, en promedio, las distancias recorridas van desde los

2,8 km (en el caso de W7 a PM3, que se visualizan muy cercanas en la Figura 2, en el departamento de Concordia) hasta los 141 km (en el caso de W7 a PM1, considerando que PM1 no cuenta con proveedores cercanos como las demás plantas). El promedio de biomasa consumida en relación con la biomasa disponible es del 91,27%.

Tabla. 3. Detalle de las distancias recorridas y aprovechamiento del recurso

BSN / BCN	Distancia (km)					Consumo (ton)	Disponible (ton)	Aprovechamiento (%)
	BP1	PM1	PM2	PM3	Prom.			
W1		109			109,00	23.936,84	25.755,04	92,94%
W2	110		63,8	62,5	78,77	21.836,78	27.180,00	80,34%
W3	108		62	60,8	76,93	19.992,67	22.378,19	89,34%
W4	109		62,9	61,6	77,83	20.089,63	21.791,95	92,19%
W5	110		69,3	62,6	80,63	20.302,07	21.576,00	94,10%
W6		105		37,7	71,35	20.175,85	21.144,00	95,42%
W7	54,9	141	4,1	2,8	50,70	1.785,68	1.785,68	100,00%
W8	131		84,4	83,2	99,53	487,31	769,44	63,33%
W9		86,9		51,9	69,40	18.772,15	19.032,00	98,63%
S1			72,5		72,50	2.961,48	3.072,00	96,40%
S2			28,7		28,70	3.262,54	3.288,00	99,23%
S3			70,2		70,20	3.200,96	3.432,00	93,27%

En relación con los niveles en inventario, la Figura 4 muestra un incremento en todas las plantas a partir del mes 8. Una situación particular ocurre en el mes 11, donde los nodos BP1 y PM1 incrementan su inventario, pero la planta PM3 disminuye considerablemente el nivel del mismo, volviendo a crecer nuevamente en el siguiente periodo. Esto sugiere que, cuando escasea la materia prima, los competidores organizan sus recursos para que todas las plantas se mantengan operativas.

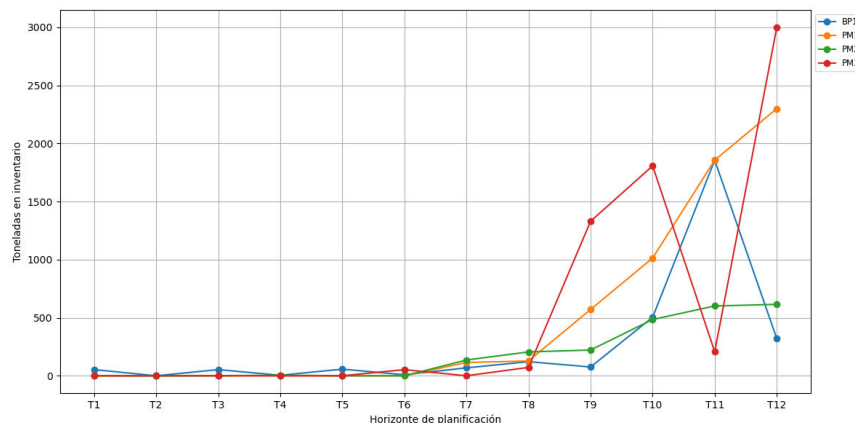


Fig. 4. Evolución del inventario de cada planta a lo largo del horizonte de planificación.

El precio que obtiene el proveedor por la biomasa varía dependiendo de la región donde la misma se consume, formando de esta manera las biocuentas anteriormente mencionadas. En la Figura 5 se muestran los valores obtenidos para la variable $P_{i,k,t}$, que indican la cantidad efectiva de dinero que recibe el proveedor por la venta de cada tipo de subproducto, considerando el promedio sobre todo el horizonte de planificación. Cuando el proveedor no comercializa un determinado tipo de biomasa, se asigna el valor 0 en el gráfico. Se observa que el precio más alto corresponde a la biomasa producida en el rodal forestal localizado en la proximidad de la ciudad de Concordia. Respecto a los chips de madera y el aserrín, se observa que los valores más elevados de la variable de precio corresponden a los establecimientos W2, W4, W3 y W5, localizados en el departamento de Federación. Esto indica que dichos aserraderos perciben una mayor ganancia que los demás por la venta de los subproductos. La característica común que poseen es que todos ellos venden biomasa a la planta BP1, la cual inicialmente está dispuesta a pagar un precio mayor por la biomasa residual puesta en fábrica, no afectando las distancias de transporte mayores a 100 km que existen entre dichos puntos de suministro y la planta de bioenergía. Del análisis realizado en la Figura 5, también se determina que existe una gran variabilidad en los precios, siendo: para el aserrín, desde 3,5 USD a 11,8 USD por tonelada; para los chips, desde 5,8 USD a 13,5 USD por tonelada; para la producción de biomasa, desde 11,5 USD a 17,2 USD por tonelada. La variabilidad existente en el precio pagado a los proveedores en las diferentes biocuentas refleja la complejidad de la dinámica involucrada en el funcionamiento de la cadena de suministros. En la práctica, esto significa que los proveedores ubicados en biocuentas de consumidores con mayor poder de negociación pueden recibir precios superiores, mientras que los más alejados o con menos alternativas enfrentan precios más bajos, lo cual puede afectar su intención de venta y/o competitividad. Para los proyectos de bioenergía, esto implica la necesidad de diseñar contratos o incentivos que les permitan competir por el recurso en zonas donde la demanda de otras industrias es más intensa.

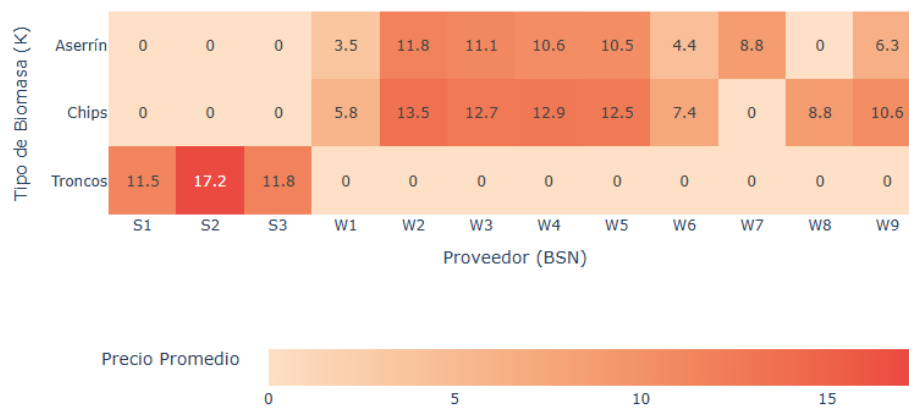


Fig. 5. Precio promedio de la biomasa forestal según cada proveedor.

Finalmente, cabe destacar que el aprovechamiento de la biomasa residual convierte residuos en recursos, minimizando el impacto ambiental que éstos generan,

colaborando en la lucha contra el cambio climático y aportando al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), principalmente ODS 7: “Energía asequible y no contaminante”, ODS 8: “Trabajo decente y crecimiento económico”, ODS 11: “Ciudades y comunidades sostenibles”, ODS 12: “Producción y consumo responsables”, y ODS 13: “Acción por el clima”.

6 Discusión

El aprovechamiento de la biomasa forestal para la generación de energía en Argentina enfrenta desafíos económicos y logísticos significativos. El modelo MIQP propuesto en el presente trabajo aborda esta problemática desde la perspectiva de la competencia de mercado por el recurso. Los resultados obtenidos demuestran que la producción de bioenergía debe competir por la biomasa residual con sectores de mayor rentabilidad, como aquella dedicada a la producción de tableros de fibras y partículas. Esta competencia no ocurre en un mercado perfecto; por el contrario, está marcada por el poder de negociación de grandes industrias que actúan como monopsonios u oligopsonios regionales que ejercen una fuerte presión sobre los precios y la disponibilidad del recurso.

En este contexto, el estudio de Manrique et al. (2023) ofrece una perspectiva complementaria que enriquece la interpretación de los hallazgos. Su análisis se enmarca en los principios de la bioeconomía circular y el "uso en cascada" de la biomasa. Según este enfoque, la bioenergía no debería ser un competidor directo por la materia prima, sino el eslabón final en la cadena de valor, destinado a aprovechar los residuos que ya no pueden ser reutilizados o reciclados para fines materiales de mayor valor. La prioridad, bajo este paradigma, es siempre maximizar la eficiencia en el uso de la materia prima, y solo después, destinar la fracción residual inevitable a la producción de energía.

La aparente contradicción entre ambos enfoques —competencia de mercado (este estudio) versus gestión circular (Manrique et al., 2023)— puede resolverse al considerar que la competencia analizada en el presente modelo representa, en gran medida, un síntoma de la ausencia de un sistema de gestión circular estructurado. La presión sobre los precios que enfrentan los proyectos bioenergéticos en Entre Ríos se agudiza porque no existe una jerarquía de usos establecida. En el modelo actual, todos los actores pujan por el mismo conjunto de subproductos accesibles, aunque se considera un precio de la biomasa subsidiado en función de la última licitación realizada por el gobierno nacional.

Además, el trabajo de Manrique et al. (2023) sugiere que el problema de fondo podría no ser una escasez real del recurso, sino la subutilización de los residuos generados. Su caso de estudio en el noroeste argentino revela que anualmente se desperdician más de 2.370 toneladas de biomasa solo en la etapa industrial. Esto indica que existe un volumen de biomasa potencialmente disponible que no entra en competencia en el mercado, principalmente por obstáculos como la dispersión espacial del recurso, la falta de información sobre los stocks, la carencia de apoyo comunitario y la ausencia de políticas públicas que incentiven una gestión integral.

Mientras el presente modelo ofrece una herramienta táctica para optimizar las decisiones de abastecimiento y minimizar costos dentro del paradigma de competencia

actual, los resultados también subrayan la necesidad de un cambio estratégico a nivel de políticas públicas. La variabilidad de precios demostrada en el presente estudio evidencia la idea de que un marco de bioeconomía circular podría generar un entorno más estable y sostenible. Fomentar el "uso en cascada" no solo alinearía al sector con los objetivos de desarrollo sostenible, sino que también podría mitigar la competencia directa, creando un nicho definido para la bioenergía como valorizadora de residuos y contribuyendo así a la viabilidad a largo plazo de estos proyectos.

En relación a la aplicabilidad de la propuesta, el modelo desarrollado incorpora supuestos simplificados necesarios para su formulación y resolución computacional, que pueden introducir sesgos en la estimación de precios y flujos óptimos, especialmente en contextos donde existen variaciones significativas de precios de la biomasa forestal, su calidad, de costos logísticos o de políticas públicas. No obstante, los resultados obtenidos constituyen un marco útil para la toma de decisiones en la cadena de suministro de biomasa forestal. En particular, permiten identificar biocuentas, estimar precios de referencia y asignaciones óptimas de subproductos bajo los supuestos establecidos, así como evaluar el impacto de distintos niveles de costos logísticos y de capacidad instalada. Integrar el modelo en procesos reales de planificación requeriría ajustar periódicamente los parámetros con datos operativos actualizados, incorporar componentes estocásticos que representen la incertidumbre en la disponibilidad y la demanda, y considerar explícitamente contratos de suministro de largo plazo, subsidios u otros instrumentos de política. De este modo, el modelo puede servir como herramienta de apoyo para productores, industrias y autoridades en la definición de estrategias de abastecimiento, inversión y regulación del sector.

7 Conclusiones

Este trabajo presentó un modelo MIQP para apoyar la toma de decisiones a nivel táctico sobre el abastecimiento de materia prima en cadenas de suministro de biomasa forestal. Su aplicación a un caso de estudio en la provincia de Entre Ríos demostró la validez y aplicabilidad de la propuesta, cuyo objetivo principal es minimizar los costos operativos totales y determinar de manera integrada los flujos óptimos de biomasa, precios de referencia y asignaciones de recursos en un entorno competitivo.

Los resultados evidencian que la modelización propuesta constituye una herramienta útil para planificar la logística y el aprovisionamiento de materia prima, identificando biocuentas, costos críticos y precios diferenciados por zona. Sin embargo, la heterogeneidad de intereses y restricciones de los distintos actores sugiere que una simple función objetivo que maximice ganancias netas puede no reflejar adecuadamente la complejidad del problema. Por ejemplo, los proveedores no sólo buscan ingresos por la venta de subproductos, sino que también desean evitar problemas ambientales asociados a la acumulación de residuos (tales como riesgo de incendios, proliferación de roedores, entre otros). Por su parte, los consumidores transforman la biomasa en productos de distinto valor agregado y, en el caso de la bioenergía, operan en un contexto de subsidios estatales que buscan favorecer la transición hacia energías limpias. Como líneas de desarrollo futuras se prevé incorporar explícitamente estas consideraciones mediante funciones multiobjetivo, así como realizar análisis de sensibilidad sobre costos de transporte y variaciones en la demanda

para evaluar la robustez del modelo y proporcionar lineamientos más sólidos para la toma de decisiones.

Agradecimientos. Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional por la financiación recibida a través del Proyecto PID UTN SIECCU0008601.

Referencias

- Acuna, M., Sessions, J., Zamora, R., Boston, K., Brown, M., & Ghaffariyan, M. R. (2019). Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. *Current Forestry Reports* 5, 124–141. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00093-4>
- Akhtari, S., Sowlati, T., & Griess, V. C. (2018). Integrated strategic and tactical optimization of forest-based biomass supply chains to consider medium-term supply and demand variations. *Applied Energy*, 213, 626–638. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.017>
- Anselmino, A., Piedra-Jimenez, F., Rodriguez, M. A., Dondo, R. G., & Cocco, M. E. (2025). Strategic optimization of short-rotation woody crops for bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, 195, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107686>
- Cambero, C., Sowlati, T., Marinescu, M., & Roser, D. (2015). Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. *International Journal of Energy Research*, 39(4), 439–452. <https://doi.org/10.1002/er.3233>
- Campanella, S., Corsano, G., & Montagna, J. M. (2018). A modeling framework for the optimal forest supply chain design considering residues reuse. *Sustainable Production and Consumption*, 16, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.06.003>
- Chopra, S. (2018). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (7.^a ed.).
- FAO. (2019). *Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo*. Colección Informes Técnicos N.º 7. Buenos Aires. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca7225es>
- Freppaz, D., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., Sacile, R., & Taramasso, A. (2004). Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level. *Biomass and Bioenergy*, 26(1), 15–25. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00079-5)
- Frombo, F., Minciardi, R., Robba, M., Rosso, F., & Sacile, R. (2009). Planning woody biomass logistics for energy production: A strategic decision model. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.008>
- Hiloidhari, M., Sharno, M. A., Baruah, D. C., Bezbaruah, A.N. (2023). Green and sustainable biomass supply chain for environmental, social and economic benefits. *Biomass and Bioenergy*, 175, 106893. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106893>
- Hmouda, A. M. O., Orzes, G., & Sauer, P. C. (2024). Sustainable supply chain management in energy production: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114085. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114085>
- INTA. (2024). *Boletín de Precios de Productos, Insumos y Servicios Forestales*. <https://drive.google.com/file/d/1HWkY5K6FHXBZWOFDOfeqBrWm1PWNQIP/view>

- Malladi, K. T., & Sowlati, T. (2018). Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>
- Manrique, S., Subelza, C., Toro, M., Bertel, Q., & Tauro, R. (2023). Forest Supply Chain for Bioenergy: An Approach for Biomass Study in the Framework of a Circular Bioeconomy. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16207140>.
- Memişoğlu, G., & Üster, H. (2016). Integrated bioenergy supply chain network planning problem. *Transportation Science*, 50(1), 35–56. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0598>
- Mohd Yahya, N. S., Ng, L. Y., & Andiappan, V. (2021). Optimisation and planning of biomass supply chain for new and existing power plants based on carbon reduction targets. *Energy*, 237, 121488. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121488>
- Mottaghi, M., Bairamzadeh, S., & Pishvae, M. S. (2022). A taxonomic review and analysis on biomass supply chain design and planning: New trends, methodologies and applications. *Industrial Crops and Products*, 180, 114747. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114747>
- Olemberg, D., & Lupi, A. M. (2024). Economic analysis of Eucalyptus biomass cultivation for energy in Argentina. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 8, 100085. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100085>
- Saghaei, M., Ghaderi, H., & Soleimani, H. (2020). Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Energy*, 197, 117165. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117165>.
- Shabani, N., & Sowlati, T. (2013). A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant. *Applied Energy*, 104, 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.013>
- Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., & Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608–627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049>
- Visser, L., Hoefnagels, R. & Junginger, M. (2020). Wood pellet supply chain costs – A review and cost optimization analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109506>
- Vitale, I., Dondo, R., González, M., & Còccola, M. (2022). Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. *Applied Energy*, 313, 118776. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118776>.
- Yue, D., You, F., & Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 36–56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>