



DISEÑO ÓPTIMO DE CADENA DE SUMINISTRO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL

Agustina Anselmino¹ – Matías González¹ – Mariana E. Cóccola^{2*}

¹UTN-FRCU, Ing. Pereyra 676, (3260) Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina

²CONICET/UTN-FRCU, Ing. Pereyra 676, (3260) Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina

*agustinaanselmino@gmail.com - camailen@hotmail.com - *marcoccola@santafe-conicet.gov.ar*

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo matemático lineal entero mixto (MILP) para dar soporte a la planeación y el desarrollo de la cadena de suministro de biocombustibles en la provincia de Entre Ríos, a partir de la reutilización de los subproductos que se generan en las distintas etapas de la industrialización de la madera. El objetivo es maximizar el Valor Presente Neto sobre un horizonte de planificación de 20 años. La aplicabilidad y utilidad del modelo de optimización se demuestran a partir de la resolución de un caso de estudio que considera la infraestructura sobre la que se desarrolla la actividad foresto-industrial en nuestro país.

Palabras Clave: OPTIMIZACIÓN – PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA – BIOMASA FORESTAL – CADENA DE SUMINISTRO – BIOCOMBUSTIBLES

ABSTRACT

This work presents a mixed-integer linear programming (MILP) model to support the planning and development in Entre Ríos Province of the biofuels supply chain from the reutilization of the residues coming from the wood industrialization. The main goal is to maximize the Net Present Value along a planning horizon of 20 years. The applicability and useful of the optimization model are demonstrated through the resolution of a case study considering the infrastructure on which forestry-industrial activity is developed in our country.

Keywords: OPTIMIZATION – STRATEGIC PLANNING – FORESTRY BIOMASS – SUPPLY CHAIN – BIOFUELS

1. INTRODUCCIÓN

La explotación forestal y las distintas etapas de industrialización de la madera generan residuos que tienen el potencial de ser aprovechados para la producción de bioenergía y biocombustibles. Se estima que el volumen de residuos generado por la industria forestal es superior al volumen de madera elaborada. La utilización de los residuos de madera como materia prima en otros procesos productivos promueve la apertura de nuevos negocios en el sector forestal-industrial, generando nuevos puestos de trabajo y fortaleciendo el desarrollo regional. Una de las principales barreras para la generación de energía a partir de biomasa forestal son los altos costos logísticos asociados (Malladi y Sowlati, 2018). Al tener baja densidad energética y estar geográficamente distribuida de manera dispersa, el costo de recolección y traslado de la biomasa hacia las plantas de conversión es un factor clave a la hora de determinar la viabilidad del mercado emergente de la bioenergía. Su alto contenido de humedad y su baja densidad aparente resultan en un requerimiento de gran capacidad de transporte y

almacenamiento. Además, el sector forestal-industrial de nuestro país se ve afectado por la baja competitividad asociada a los altos costos en logística y transporte por infraestructura inadecuada.

Si bien muchos trabajos han sido publicados en la literatura sobre la logística de la biomasa forestal (Malladi y Sowlati, 2018), poca es la investigación que se ha desarrollado considerando la infraestructura logística de la cadena de valor foresto-industrial de la Argentina. Por ejemplo, se estima que el 68% de los aserraderos que funcionan en la provincia de Entre Ríos son de tamaño micro o pequeño, con volúmenes de producción menores a 4720 m³ por año. Esto obliga a pensar en una estructura de cadena de suministro con muchos, pero pequeños proveedores de materia prima, plantas de conversión de mediano/pequeño tamaño y distancias de traslado que no superen los 100 km entre los proveedores y las plantas de producción (Vitale et al., 2022).

La estructura de la cadena de suministro (CS) a considerar se ilustra en la Figura 1. En el Documento Técnico N.º 19 publicado en el año 2020 por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO), se estima que las forestaciones aportan más de 4.6 millones de t/año de residuos potenciales para fines energéticos, lo que las convierte en la mayor fuente de oferta directa de biomasa seca en el país. Por otra parte, la transformación primaria y secundaria de la madera también genera residuos tales como costaneros, despuntes, virutas, aserrín, corteza y astillas. Se calcula que la oferta de biomasa proveniente de las industrias de la madera totaliza un volumen de 6.258.719 m³ sólidos de residuos por año, que, convertido a biomasa, resulta en 3.129.360 t/año. La biomasa seca puede ser utilizada para satisfacer necesidades energéticas mediante procesos termoquímicos o fisicoquímicos, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Particularmente, en este trabajo se contemplará como alternativas de conversión la producción de briquetas, pellets y etanol, evaluando distintos tamaños de planta y ubicaciones alternativas para su instalación.

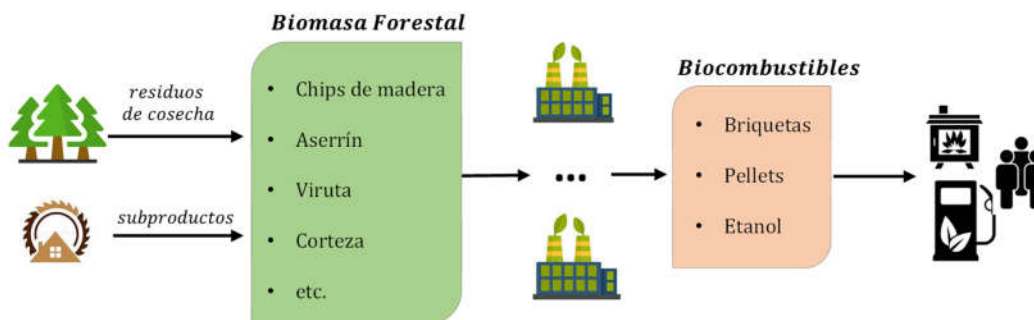


Figura 1: Estructura de la cadena de suministro

De esta manera, se expone el desarrollo de un modelo de optimización que sirva como soporte para la toma de decisiones a nivel estratégico en la cadena de la biomasa forestal de la provincia de Entre Ríos. El principal objetivo es maximizar el Valor Presente Neto (VPN) sobre un horizonte de planificación de 20 años, identificando la configuración óptima que deberá tener la cadena de suministro y los procesos que en esta se realizarán. Las decisiones estratégicas incluyen la localización, número y capacidad de los centros de producción, almacenaje y distribución, los productos a ser manufacturados en las diferentes localizaciones y el porcentaje de la demanda del mercado que podría llegar a ser cubierta con la materia prima disponible.



2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La estructura presentada en la Figura 1 se puede representar matemáticamente a través del conjunto de nodos $F = \{F^S \cup F^P \cup F^M\}$, donde F^S identifica a los proveedores de materia prima, F^P incluye las potenciales ubicaciones de las plantas de conversión y F^M determina el conjunto de mercados a abastecer. Cada par de nodos (f, f') en la red de suministro está conectado por un segmento de ruta caracterizado por una distancia en km. El periodo de planificación involucra múltiples periodos de tiempo $T = \{t_1, t_2, \dots, t_T\}$, donde cada periodo representa un año calendario. Además, se definen los conjuntos $B = \{b_1, b_2, \dots, b_B\}$ y $K = \{k_1, k_2, \dots, k_K\}$ para identificar a las materias primas y los tipos de productos, respectivamente, que se movilizan a lo largo de la CS. Para cada mercado $f \in F^M$ se estima una demanda máxima anual para cada tipo de producto, dato que es representado a través del parámetro $dem_{k,f,t}$. Los precios de venta $precio_{k,f,t}$ son dependientes del tipo de biocombustible, del mercado y del año. Las plantas de conversión $f \in F^P$, dependiendo del tipo de producto, pueden instalarse con distintas capacidades de producción $C = \{c_1, c_2, \dots, c_C\}$, siendo la capacidad nominal establecida a través del parámetro $cap_{k,c}$. Los costos fijos y variables de producción son dependientes del tipo de producto, de la capacidad de procesamiento que tenga la planta y del periodo de planificación, y se determinan a través de los parámetros $costo_{k,c,t}^{fijo}$ y $costo_{k,c,t}^{variable}$, respectivamente. El volumen de producción de cada planta será directamente proporcional la cantidad y tipo de materia prima procesada, siendo $fc_{b,k}$ el factor que determina la conversión de toneladas de materia prima a unidades de producto terminado (tonelada o metros cúbicos, según corresponda). La materia prima disponible en cada proveedor $f \in F^S$ se estima de manera anualizada a través del parámetro $biomasa_{b,f,t}$. Los precios de la biomasa $costo_{b,f,t}^{BIOM}$ son dependientes del tipo de materia prima, del proveedor y del año. El movimiento de los residuos desde su origen hacia las plantas de conversión y la distribución del producto terminado, aguas abajo en la CS, se realiza utilizando el modo de transporte terrestre con un costo dependiente del tipo de material a transportar y el periodo de planificación; $costo_{b,t}^{BIOM}$ y $costo_{k,t}^{BIOC}$ representan, respectivamente, el costo de transportar por km una tonelada (o metro cúbico) de materia prima o producto terminado durante el periodo t . El objetivo principal del problema es maximizar el Valor Presente Neto (VPN) para todo el horizonte planificación, considerando los ingresos por ventas y los egresos operativos asociados al funcionamiento de la CS. Para cada año del horizonte de planificación, la estrategia de optimización debe determinar:

- La cantidad y tipo de plantas de conversión a instalar, su ubicación y tamaño.
- Las toneladas de materia prima a procesar en cada una de las potenciales plantas.
- El volumen anual de producción de cada tipo de biocombustibles.
- El porcentaje de demanda cubierta de los mercados para cada tipo de biocombustible.

3. MODELO MILP

El problema antes descrito se representa matemáticamente a través de un modelo de programación lineal entero mixto (MILP). La función objetivo que busca maximizar el VPN se define a través de la expresión (1), donde α representa la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos del proyecto con el valor presente de los egresos:



$$\text{maximize } VPN = \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + \alpha)^{t-1}} (\text{Ingresos}_t - \text{Costos}_t) \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones (2)-(11):

$$\text{Ingresos}_t = \sum_{k \in K} \sum_{f \in F^P} \sum_{f' \in F^M} \text{precio}_{k,f',t} V_{k,f,f',t} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Costos}_t = & \sum_{b \in B} \sum_{f \in F^S} \sum_{f' \in F^P} (\text{costo}_{b,f,t}^{\text{BIOM}} + \text{costo}_{b,t}^{\text{BIOM}} \text{dist}_{f,f'}) P_{b,f,f',t} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{f \in F^P} (\text{costo}_{k,c,t}^{\text{fijo}} Y_{k,c,f,t} + \text{costo}_{k,c,t}^{\text{variable}} Q_{k,c,f,t}) \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{f \in F^P} \sum_{f' \in F^M} \text{costo}_{k,t}^{\text{BIOC}} \text{dist}_{f,f'} V_{k,f,f',t} \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\text{biomasa}_{b,f,t} \geq \sum_{f' \in F^P} P_{b,f,f',t} \quad \forall b \in B, f \in F^S, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{f' \in F^S} P_{b,f',t} = \sum_{k \in K} U_{b,f,k,t} \quad \forall b \in B, f \in F^P, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{c \in C} Q_{k,c,f,t} = \sum_{b \in B} f c_{b,k} U_{b,f,k,t} \quad \forall k \in K, f \in F^P, t \in T \quad (6)$$

$$Q_{k,c,f,t} \leq \text{cap}_{k,c} Y_{k,c,f,t} \quad \forall k \in K, f \in F^P, c \in C, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{c \in C} Y_{k,c,f,t} \leq 1 \quad \forall k \in K, f \in F^P, t \in T \quad (8)$$

$$Y_{k,c,f,t-1} \leq Y_{k,c,f,t} \quad \forall k \in K, f \in F^P, c \in C, t \in T \quad (9)$$

$$I_{k,f,t} = I_{k,f,t-1} + \sum_{c \in C} Q_{k,c,f,t} - \sum_{f' \in F^M} V_{k,f,f',t} \quad \forall k \in K, f \in F^P, t \in T \quad (10)$$

$$\text{dem}_{k,f,t} \geq \sum_{f' \in F^P} V_{k,f',t} \quad \forall k \in K, f \in F^M, t \in T \quad (11)$$

De acuerdo con la ecuación (2), los ingresos para cada periodo de tiempo se calculan considerando el precio de venta de los productos y el valor de la variable de decisión $V_{k,f,f',t}$, que determina la cantidad de producto k que se entrega desde la fábrica $f \in F^P$ al mercado $f' \in F^M$ durante el correspondiente periodo t . Para el cálculo de los egresos de cada periodo, la ecuación (3) considera las siguientes variables: $P_{b,f,f',t}$ que determina la cantidad de biomasa b que es provista por el proveedor f a la planta f' durante el periodo t , $Y_{k,c,f,t}$ variable 0-1 que determina si en la ubicación f durante el periodo t funcionará una planta de producto k con capacidad c , $Q_{k,c,f,t}$ que establece la cantidad de producto k que se produce en la planta f con capacidad c durante el periodo t y $V_{k,f,f',t}$ que determina la cantidad de producto k que se distribuye desde la planta con ubicación f al



mercado f' durante el periodo t . La restricción (4) establece que la cantidad de biomasa a ser adquirida por todas las plantas desde un mismo proveedor no puede ser superior a la materia prima disponible en ese periodo. Para evitar el deterioro de la materia prima, la restricción (5) obliga a cada planta a utilizar toda la materia prima adquirida en cada periodo. La variable $U_{b,f,k,t}$ determina la cantidad de materia prima b que se utiliza en la planta con ubicación f para producir producto k durante el periodo t . Cuando dicha variable se multiplica por el factor de conversión $f c_{b,k}$, se obtiene la cantidad total de producto elaborado en dicho periodo, como se especifica en la ecuación (6). La restricción (7) establece una cota superior a la cantidad de producto que se puede elaborar en una determinada ubicación en cada periodo. La restricción (8) determina que en cada ubicación $f \in F^P$ se puede instalar a lo sumo una fábrica de cada tipo de producto. Cuando se decide habilitar una planta de producción en un periodo t , la misma deberá seguir funcionando durante todos los periodos siguientes, hasta el final del horizonte de planificación, como lo especifica la restricción (9). El inventario de cada planta al final de un determinado periodo $I_{k,f,t}$ se calcula a través de la restricción (10). Finalmente, la restricción (11) impone una cota superior a la cantidad de producto que puede ser enviado a cada mercado en cada periodo.

4. CASO DE ESTUDIO

El modelo de optimización (1)-(11) se utilizó para resolver un caso de estudio de la provincia de Entre Ríos, en donde funcionan más de 200 aserraderos, que transforman en subproductos alrededor del 65% de la madera que procesan. Se considera una CS con 10 proveedores que suministran chip de pino, chip de eucalipto y aserrín como materia prima. Se proponen 4 posibles ubicaciones para la apertura de las plantas de conversión, considerando como alternativas la producción de briquetas, pellets o etanol. Para cada tipo de producto, se proponen 2 capacidades de planta con distintos costos de producción (fijos y variables). En el último eslabón de la cadena, se consideran 4 mercados de consumo regionales, para cada uno de los cuales se estimó una demanda máxima anualizada. Todos los costos y precios son expresados en USD, considerando un horizonte de planificación de 20 años y una tasa de descuento del 5%. El algoritmo de optimización fue desarrollo en PYOMO-PYTHON y ejecutado sobre una PC con 8 GB de RAM y 8 núcleos con 16 hilos a 2.9 GHz, utilizando GUROBI como resolvidor MIP. Los resultados obtenidos en la función objetivo del problema se resumen en la Tabla 1. Dicha tabla muestra cuanto contribuye cada operación al costo total.

VPN (USD)	Ingresos (USD)	Costos (USD)			
		Materia Prima	Recolección	Producción	Distribución
42.437.823	158.228.703	115.790.880			
		9.85%	8.43%	76.34%	5.38%

Tabla 1: Valores operativos a valor presente para todo el horizonte de planificación

En la solución óptima se decide poner en operación a partir del año 1, una planta de producción de etanol y 2 plantas de pellets. A partir del periodo 10, se decide la apertura de una tercera planta productora de pellets. Además, ante la elección del tamaño de las plantas, siempre se elige la opción de menor capacidad de procesamiento. En la Figura 2 se detalla para cada periodo de tiempo, las toneladas de residuos disponibles y la cantidad utilizada para la producción de cada tipo de biocombustible. Cómo se puede observar en la Figura, en todos los periodos de tiempo, salvo los años 8 y 9, se utiliza



toda la biomasa disponible para su conversión en biocombustibles. Finalmente, la producción de briquetas no fue considerada rentable para los valores operativos considerados en el caso de estudio resuelto.

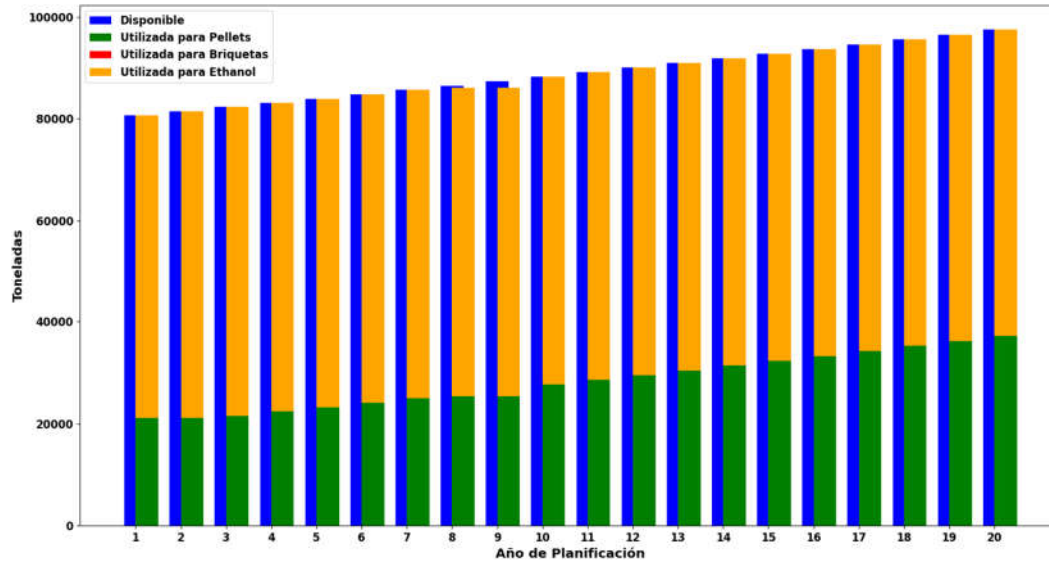


Figura 2: Cantidad de biomasa disponible y utilizada

5. CONCLUSIONES

Se presentó un enfoque de optimización de tipo determinístico para la planificación estratégica de la cadena de suministro de biocombustibles en la provincia de Entre Ríos. A través de la resolución de un caso de estudio se demostró la utilidad del modelo para dar soporte al proceso de toma de decisiones. Como trabajo futuro se espera poder abordar la incertidumbre asociada a los procesos estudiados a través de la técnica de optimización robusta y considerar de manera simultánea, en la función objetivo, indicadores económicos, sociales y medioambientales.

6. REFERENCIAS

Malladi, K. T. y Sowlati, T. (2018): "Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94., 587-599.

Vitale, I., Dondo, R., González, M. y Cóccola, M. (2022): "Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain". *Applied Energy*, vol. 313.

FAO. (2020): "Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 19". Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8764es>.