

Planificación Estratégica de Plantaciones Dendroenergéticas para la Cadena de Suministro de la Biomasa Forestal

Agustina Anselmino¹, Frank Piedra-Giménez², Matías Novas³, Analía Rodríguez²,
Rodolfo Dondo⁴, Mariana Cóccola¹

¹ CONICET/UTN-FRCU, E3264 Concepción del Uruguay, Argentina

² IPQA (UNC – CONICET), X5016GCA Córdoba, Argentina

³ CIEM (UNC – CONICET), X5000HUA Córdoba, Argentina

⁴ INTEC (UNL – CONICET), S3000 Santa Fe, Argentina

anselmioagustina@conicet.gov.ar; fpiedra@mi.unc.edu.ar;
jmnovas@famaf.unc.edu.ar; analia.rodriguez@unc.edu.ar;
rdondo@santafe-conicet.gov.ar; marcococcola@santafe-conicet.gov.ar

Resumen. Este trabajo presenta un modelo matemático lineal entero mixto (MILP) diseñado para apoyar la planificación estratégica de la cadena de suministro de bioenergías y/o biocombustibles, considerando la implantación y manejo de plantaciones dendroenergéticas. El modelo propuesto incluye decisiones relacionadas a la planificación forestal, la recolección y transporte de la biomasa, la conversión de esta en bioenergía y/o biocombustibles, así como la inyección de energía a la red y/o la venta y distribución de pellets a los mercados. El objetivo es maximizar el Valor Actual Neto (VAN) a lo largo de un horizonte de planificación de 20 años. La efectividad y utilidad del modelo se demuestran mediante la resolución de un caso de estudio que considera la infraestructura asociada con la actividad foresto-industrial en la provincia de Entre Ríos.

Palabras clave: Optimización, Planificación Estratégica, Biomasa Forestal, Bioenergía, Plantaciones Dendroenergéticas.

1 Introducción

Desde la perspectiva internacional, nuestro país tiene el potencial de desarrollar fuentes de energía renovables no convencionales, como la dendroenergía, debido al volumen y a la gran cantidad de fuentes de biomasa existentes. Como principal fuente de suministro, está la posibilidad de obtener la materia prima a partir de los subproductos de la industria de la madera, en particular los residuos o chips generados por los aserraderos. A pesar de su potencial uso para la producción de bioenergía, un alto porcentaje de estos subproductos se comercializan a empresas de celulosa y de tableros de fibra y partículas, que los utilizan como materias primas para sus procesos [1]. Por otro lado, las actividades de poda y raleo y los residuos de cosecha de las plantaciones forestales también representan una oferta importante de biomasa en el país [2].

En los últimos años, se ha comenzado a explorar la posibilidad de usar tierras marginales (no aptas para la producción agropecuaria) para implantar cultivos y plantaciones forestales destinados específicamente a la producción de biomasa para uso energético. Esto no solo permite incrementar la oferta de biomasa disponible y evitar la competencia con otras industrias que también usan los residuos forestales como insumos en sus procesos, sino que también promueve el desarrollo de las economías rurales, a la vez que no compite con la producción de alimentos o cultivos forrajeros [3]. La Región Mesopotámica de nuestro país posee un gran potencial para plantaciones dendroenergéticas, principalmente de la especie *Eucalyptus grandis*, con una superficie apta de aproximadamente 348.146 hectáreas [4].

En lo que respecta a la dendroenergía, la mayoría de los estudios publicados en la literatura se basan en la planificación y desarrollo a partir de la utilización de residuos tanto forestales como de la industria maderera. En pocos análisis se contempla la implantación de bosques específicamente orientados a su explotación para la generación de energía [4]. El objetivo principal de estos estudios realizados es reducir los costos logísticos asociados por unidad de bioenergía generada para que esta pueda competir en el mercado con las formas de energía convencionales.

Para evaluar la potencialidad de las plantaciones dendroenergéticas en la cadena de suministro de la biomasa forestal, se propone un modelo de optimización para la toma de decisiones a nivel estratégico para la producción de bioenergía y/o biocombustibles. El modelo incluye decisiones relacionadas a los manejos productivos de los rodales disponibles (periodo de implantación, ciclos de producción y turnos de corta) y la localización, tipo y capacidad de las tecnologías de conversión a ser utilizadas. El objetivo es maximizar el Valor Actual Neto (VAN) en un horizonte de planificación de 20 años.

El modelo propuesto es utilizado para resolver un caso de estudio diseñado para evaluar el desarrollo de proyectos dendroenergéticos en varios departamentos de la provincia de Entre Ríos. En Argentina, mediante el programa RenovAr, se han construido plantas dedicadas a la producción de energía a partir de residuos forestales, todas ellas operando con sistemas de combustión. No obstante, en Entre Ríos actualmente no existen plantas de este tipo. Además, el caso de estudio propuesto también pretende analizar el uso de los sistemas de gasificación de la biomasa, una tecnología que en Argentina todavía no se encuentra en uso pero que, sin embargo, diversos estudios [5], [6] han demostrado su potencial para la producción de energía a partir de biomasa, con altas eficiencias en producciones a gran escala (> 2 MW).

2 Definición del problema

Como se ilustra en la Figura 1, el problema de planificación estratégica abordado considera una cadena de suministro que incluye diferentes ubicaciones $I = \{I^S \cup I^W \cup I^L \cup I^M\}$, las cuales representan, respectivamente, los sitios forestales I^S , las industrias que procesan la madera I^W , las potenciales ubicaciones de las plantas de conversión I^L , y los mercados I^M a los cuales comercializar y distribuir los biocombustibles que se produzcan.

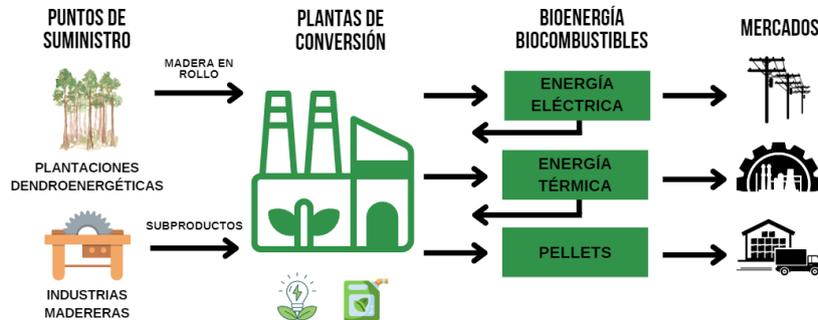


Fig. 1. Estructura de la cadena de suministro.

Los sitios disponibles para explotación con fines dendroenergéticos se caracterizan por su dimensión en número de hectáreas, y se le permite al modelo de planificación decidir sobre cuales sitios se establece una plantación en cada periodo del horizonte de planificación. Para el establecimiento de un rodal, el modelo matemático también debe determinar el tipo de modelo productivo $f \in F$ a ser aplicado. Cada alternativa de manejo f establece a priori la densidad de la plantación, la duración del ciclo productivo, el tiempo entre turnos de corta, y los rendimientos de cosecha.

Además de la biomasa que se obtiene de las plantaciones dendroenergéticas, las plantas de conversión pueden utilizar como materia prima los subproductos provenientes de las industrias madereras, principalmente los aserraderos, que generan un número significativo de residuos, tales como corteza, aserrín, virutas y recortes. Para cada año en el horizonte de planificación, se estima la cantidad de biomasa disponible en cada industria maderera $w \in W$, con un precio de venta conocido que varía según el tipo de subproducto.

El transporte desde los puntos de suministro (sitios forestales o aserraderos) hacia las plantas de conversión se realiza mediante camiones cuyo costo de operación se establece en toneladas por kilómetro, contabilizando el costo de transportar una tonelada de biomasa a lo largo de un kilómetro. El costo de transporte es dependiente del tipo de biomasa $k \in K$ a ser transportada y varía según la densidad de esta.

En cada potencial ubicación de planta $i \in I^L$, se pueden instalar una o más tecnologías de conversión $j \in J$ para la producción de bioenergía (térmica y/o eléctrica) o biocombustibles. Cada tecnología se caracteriza por su capacidad (en MW o toneladas, según el tipo de producto a generar), las eficiencias eléctricas y térmicas (si corresponde), el factor de utilización de la capacidad instalada, y el factor de disponibilidad de operación. Los costos de instalación están asociados a cada tipo de tecnología, la cual una vez operativa también incurre en costos operativos fijos y variables. Los costos fijos incluyen costos de seguros, impuestos y mantenimiento anual, mientras que los costos variables dependen de las toneladas de biomasa procesada, y pueden incluir costos asociados a la compra de energía (eléctrica o térmica) en el caso de que la demanda interna no pueda ser satisfecha con producción propia. El consumo interno de electricidad y calor principalmente ocurre durante los procesos de chipeado y secado de la biomasa forestal. La energía térmica se utiliza principalmente para secar la biomasa húmeda cuando ingresa a la planta, y su consumo se mide en MWh por tonelada de

agua evaporada. Por otro lado, el consumo de energía eléctrica se mide en MWh/ton, y depende de las toneladas de biomasa a ser procesadas en la planta.

La mayoría de los sistemas de conversión requieren de un proceso de secado previo de la biomasa entrante para que esta pueda alcanzar un contenido de humedad de entre el 10 y el 30% en base húmeda. La etapa de secado consiste en la evaporación de agua contenida en el recurso, y a través de un parámetro que considera los valores de humedad entrantes y salientes es posible determinar la cantidad de biomasa seca resultante. Finalmente, también es necesario conocer a priori el poder calorífico inferior (PCI) de cada tipo de biomasa k para cada tecnología de conversión j , lo cuál determina la cantidad de energía contenida (MWh/ton) considerando el umbral de humedad requerido por la correspondiente tecnología j .

La energía eléctrica producida en cada lugar puede inyectarse a la red de distribución o ser utilizada por consumidores cercanos. La energía térmica también será utilizada por industrias cercanas que necesitan calor para sus procesos. Los precios de venta de cada unidad de energía producida están previamente establecidos. Por su parte, los biocombustibles son distribuidos en diferentes mercados a un determinado precio de venta y considerando un costo de transporte que se establece en USD/ton.km.

La solución al problema descrito tiene como objetivo determinar para cada año $t \in T$ del horizonte de planificación: (i) Los rodales que se establecerán junto con el modelo productivo a ser aplicado sobre cada uno; (ii) Los rodales a cosechar, las toneladas de biomasa producidas y la cantidad transportada a cada tecnología en operación; (iii) La cantidad de residuos de madera comprados a cada industria proveedora y transportados hacia las ubicaciones de las plantas de conversión; (iv) La instalación y operación de una o más tecnologías de conversión en cada ubicación de planta; (v) La cantidad de energía térmica y eléctrica o biocombustibles producida por cada tecnología en funcionamiento; (vi) La cantidad de biocombustibles distribuidos desde cada planta hacia cada mercado.

3 Formulación Matemática

El problema descrito puede representarse matemáticamente a través de un enfoque de programación lineal entera mixta (MILP). La formulación utiliza tres variables binarias: $X_{i,f,t}$ que vale 1 cuando el rodal $i \in I^S$ se establece en el periodo t bajo un modelo productivo f , $Y_{i,f,t}$ que determina los periodos de cosecha de cada rodal, y $Z_{j,i,t}$ que indica si la tecnología de conversión j opera en una determinada ubicación de planta $i \in I^L$ durante el periodo t . El objetivo (1) es maximizar el VAN en un horizonte de planificación de $|T|$ cantidad de años. Los ingresos obtenidos por la venta de bioenergía y/o biocombustibles se calculan a través de la variable continua Rev_t , mientras que los costos totales de operación para cada periodo se determinan a partir de la variable continua $Cost_t$. El parámetro ir representa la tasa de descuento, la cual permite calcular el valor actual/presente del beneficio económico que se obtendrá por la duración total del proyecto al finalizar el horizonte de planificación.

$$\max NPV = \sum_{t \in T} \frac{Rev_t - Cost_t}{(1 + ir)^{t-1}} \quad (1)$$

Las restricciones del problema se agrupan según su tipo en los siguientes bloques. En la nomenclatura, se utilizan letras minúsculas para identificar los parámetros y letras mayúsculas para referenciar las variables de decisión del problema.

Bloque 1: Ingresos y costos operativos. Las ganancias obtenidas en cada año $t \in T$ (Ec. (2)) pueden provenir de la venta de bioenergía o biocombustibles, es decir, energía térmica, eléctrica y/o pellets producidos por cualquiera de las tecnologías de conversión que operan en cada ubicación $i \in I^L$ durante el horizonte de planificación. Por otro lado, la Ec. (3) determina que el costo total en cada año es igual a la suma de los costos incurridos en las operaciones que se desarrollan a lo largo de toda la cadena de suministro: establecimiento, manejo y cosecha de los rodales, compra de biomasa a industrias madereras, transporte de la materia prima desde los puntos de suministro a las plantas de conversión, instalación y operación de las tecnologías de conversión en las diferentes ubicaciones, y distribución de los pellets hacia los mercados.

$$Rev_t = \sum_{i \in I^L} \sum_{t \in T} price^{power} E_{i,t} + \sum_{i \in I^L} \sum_{t \in T} price^{heat} H_{i,t} + \sum_{i \in I^L} \sum_{i' \in I^M} \sum_{t \in T} price^{pellet} p_{i,i',t} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$Cost_t = ProdCost_t + HarvestCost_t + BiomassCost_t + TransporCost_t + InstCost_t + FixedOperCost_t + VarOperCost_t + EnergyCost_t + DistCost_t \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$ProdCost_t = ha_i \left(\sum_{f \in F} \sum_{i \in I^S} pc_f X_{i,f,t} + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I^S} wcfa_f \sum_{t': t' \leq t} X_{i,f,t'} \right) \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$HarvestCost_t = \sum_{f \in F} \sum_{i \in I^S} hc_f PR_{i,f,t} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$BiomassCost_t = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^W} \sum_{j \in J} \sum_{i' \in I^L} bp_{k,i} QM_{k,i,i',j,t} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$TransportCost_t = \sum_{i \in I^S} \sum_{j \in J} \sum_{i' \in I^L} d_{i,i'} tc^{biomass} QS_{i,i',j,t} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^W} \sum_{j \in J} \sum_{i' \in I^L} d_{i,i'} tc^{biomass} QM_{k,i,i',j,t} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$InstCost_t = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I^L} ic_j (Z_{j,i,t} - Z_{j,i,t-1}) \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$FixedOperCost_t = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I^L} foc_j Z_{j,i,t} \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$VarOperCost_t = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I^L} voc_j C_{j,i,t} \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$EnergyCost_t = \sum_{j \in J} cost^{power} E_{i,t}^- + cost^{heat} H_{i,t}^- \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$DistCost_t = \sum_{i \in I^L} d_{i,i'} tc^{pellets} \sum_{i' \in I^M} P_{i,i',t} \quad \forall t \in T \quad (12)$$

Los costos de cosecha son dependientes de la productividad de cada rodal $PR_{i,f,t}$. Los costos de compra de biomasa y los costos de transporte, en cada año $t \in T$, se calculan a partir de las variables continuas que determinan las toneladas de cada tipo de biomasa $k \in K$ transportada desde los aserraderos $QM_{k,i,i',j,t}$ y los sitios forestales $QS_{i,i',j,t}$ a la ubicación de planta i' para ser procesadas por una tecnología específica j . Por otro lado, los costos relacionados a las operaciones de la planta incluyen la inversión inicial para comenzar a operar una determinada tecnología j , más los costos operativos fijos y variables, siendo estos últimos calculados a partir de la capacidad operativa $C_{j,i,t}$ de cada tecnología j . Además, se considera la compra de energía eléctrica $E_{i,t}^-$ y térmica $H_{i,t}^-$ cuando éstas no puedan autoabastecerse a partir de la producción propia. Finalmente, los costos de distribución se calculan a partir de las toneladas de biocombustibles $P_{i,i',t}$ transportadas desde las plantas hacia los mercados.

Bloque 2: Establecimiento y gestión de rodales. Para cada sitio disponible $i \in I^S$, la Ec. (13) determina que el establecimiento de la plantación puede realizarse a lo sumo en un periodo $t \in T$ durante el horizonte de planificación, y utilizando solo un tipo de manejo productivo f . Por lo tanto, el número de ciclos de aprovechamiento en cualquier rodal está limitado por el número de años que éste se encuentre activo dividido el periodo de rotación, o bien por el número máximo de rotaciones consideradas en el modelo productivo elegido para el manejo del rodal (Ec. (14)). Luego, a través de la variable $Y_{i,f,t}$ se determinan los periodos de cosecha considerando tanto el año de cultivo del rodal como el modelo productivo aplicado (Ecs. (15) y (16)). Finalmente, la productividad $PR_{i,f,t}$ de un rodal en cada periodo de tiempo dependerá de si dicho rodal se cosecha ese año, y también del número de cortas realizadas previamente, como lo establece la Ec. (17). Para representar los efectos del número acumulado de cortas sobre la productividad, se supone que el rendimiento de la primera rotación hy_f se reduce en un porcentaje ly_f en cada una de las siguientes rotaciones.

$$\sum_{f \in F} \sum_{t \in T} X_{i,f,t} \leq 1 \quad \forall i \in I^S \quad (13)$$

$$\sum_{t \in T} Y_{i,f,t} \leq \frac{(|T| - \text{ord}(t)) \sum_{t \in T} X_{i,f,t}}{yr_f} \quad \forall i \in I^S, f \in F \quad (14a)$$

$$\sum_{t \in T} Y_{i,f,t} \leq \sum_{t \in T} rq_f X_{i,f,t} \quad \forall i \in I^S, f \in F \quad (14b)$$

$$Y_{i,f,t'} + X_{i,f,t} \leq 1 \quad \forall i \in I^S, f \in F, (t, t') \in T: t' \leq t \quad (15)$$

$$Y_{i,f,t'} \geq X_{i,f,t} \quad \forall i \in I^S, f \in F, (t, t') \in T: t' > t \ \& \ \text{mod}(t' - t, yr_f) = 0 \quad (16)$$

$$PR_{i,f,t} = ha_s \left(\sum_{f \in F} hy_f (Y_{i,f,t} - ly_f \sum_{t' \in T: (t' < t)} Y_{i,f,t'}) \right) \quad \forall i \in I^S, f \in F, t \in T \quad (17)$$

Bloque 3: Suministro de la biomasa a las plantas de conversión. Existe un límite en la cantidad de biomasa que puede ser suministrada desde cada fuente (industria maderera o plantación dendroenergética) para el funcionamiento de todas las tecnologías que se encuentren en operación durante cada periodo de tiempo, como lo establecen las Ecs. (18) y (19).

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I^L} QM_{k,i,i',j,t} \leq ba_{k,i,t} \quad \forall k \in K, i \in I^W, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I^L} QS_{i,i',j,t} \leq \sum_{f \in F} PR_{i,f,t} \quad \forall i \in I^S, t \in T \quad (19)$$

Bloque 4: Operación de las tecnologías de conversión en cada ubicación de planta. Cualquier tecnología de conversión $j \in J$ puede operar en cada potencial ubicación de planta $i \in I^L$, y una vez instalada, ésta continúa en operación hasta el final del horizonte de planificación (Ec. (20)). En cuanto a la capacidad de las tecnologías cap_j , la Ec. (21) impone límites mínimos y máximos para su utilización. El parámetro uf_j determina la tasa mínima de utilización, mientras que $\pi_j = 24 * 365 * \alpha_j$ representa la cantidad de horas que una determinada tecnología j puede estar operativa durante un año, siendo α_j el porcentaje de tiempo que el sistema está disponible para operar sin considerar el tiempo que pueden insumir las actividades de mantenimiento preventivo y/o correctivo. La capacidad utilizada por cada tecnología en operación $C_{j,i,t}$ y la eficiencia de conversión determinan el flujo de entrada $IN_{j,i,t}$ a ser procesado (Ec.(22)). Dicho flujo de entrada se computa de diferentes maneras, dependiendo si la

tecnología en cuestión produce bioenergía (Ec. (23)) o biocombustibles (Ec. (24)). Para las tecnologías que producen bioenergía, la energía total que ingresa al sistema multiplicada por la eficiencia de conversión determina cuánto calor y electricidad pueden generarse (Ecs. (25) y (26)). Finalmente, para determinar la producción neta de cada tipo de energía en cada planta, las Ecs. (27) y (28) computan las necesidades térmicas y eléctricas (en MWh) de todas las tecnologías de conversión que operan en dicha ubicación. Las variables $H_{i,t}$ y $E_{i,t}$ determinan el consumo interno de energía térmica y eléctrica, respectivamente, que proviene de la producción propia.

$$Z_{j,i,t} \geq Z_{j,i,t-1} \quad \forall j \in J, i \in I^L, t \in T \quad (20)$$

$$uf_j cap_j \pi_j Z_{j,i,t} \leq C_{j,i,t} \leq cap_j \pi_j Z_{j,i,t} \quad \forall j \in J, i \in I^L, t \in T \quad (21)$$

$$C_{j,i,t} = \frac{IN_{j,i,t}}{\phi_j} \quad \forall j \in J, i \in I^L, t \in T \quad (22)$$

$$IN_{j,i,t} = \delta_j \rho \left(\sum_{k \in K} \sum_{i' \in I^W} dr_{k,j} l h v_{k,j} Q M_{k,i',i,j,t} + \sum_{i' \in I^S} dr_{chip,j} l h v_{chip,j} Q S_{i',i,j,t} \right) \quad \forall j \in (J^{Heat} \cup J^{Power}), \quad i \in I^L, t \in T \quad (23)$$

$$IN_{j,i,t} = \sum_{k \in K} \sum_{i' \in I^W} dr_{k,j} Q M_{k,i',i,j,t} + dr_{chip,j} \sum_{i' \in I^S} Q S_{i',i,j,t} \quad \forall j \in J^{Pellet}, i \in I^L, t \in T \quad (24)$$

$$H_{i,t} = \sum_{j \in J} \phi_j^h IN_{j,i,t} - H_{i,t} \quad \forall j \in J^{heat}, i \in I^L, t \in T \quad (25)$$

$$E_{i,t} = \sum_{j \in J} \phi_j^e IN_{j,i,t} - E_{i,t} \quad \forall j \in J^{Power}, i \in I^L, t \in T \quad (26)$$

$$H_{i,t}^- = \sum_{j \in J} \eta_j^H \left(\sum_{k \in K} \sum_{i' \in I^M} (1 - dr_{k,j}) Q M_{k,i',i,j,t} + \sum_{i' \in I^S} (1 - dr_{chip,j}) Q S_{i',i,j,t} \right) - H_{i,t} \quad \forall i \in I^L, t \in T \quad (27)$$

$$E_{i,t}^- = \sum_{j \in J} \eta_j^E \left(\sum_{k \in K} \sum_{i' \in I^W} QM_{k,i',i,j,t} + \sum_{i' \in I^S} QS_{i',i,j,t} \right) - E_{i,t} \quad \forall i \in I^L, t \in T \quad (28)$$

Bloque 5: Venta de la bioenergía y/o biocombustibles producidos. Cerca de cada ubicación alternativa de planta $i \in I^L$ se identifican varias industrias de pequeño tamaño como consumidores potenciales de la energía térmica que se puede producir en dicha planta. Las Ecs. (29) y (30) obligan a que la energía térmica producida en cualquier planta instalada sea menor que el consumo potencial de calor máximo $hd_{i,t}^{MAX}$, pero mayor que la demanda mínima $hd_{i,t}^{MIN}$, si al menos una tecnología térmica ha sido instalada en una ubicación i . En cuanto a las plantas de pellets en operación, la cantidad de producto vendido a los mercados no debe ser mayor que la producción total de cada instalación (Ec. 31). Además, en cada periodo, las toneladas de pellets recibidas por cada mercado no deben exceder su demanda estimada en ese periodo (Ec. 32).

$$H_{i,t} \leq hd_{i,t}^{MAX} \quad \forall i \in I^L, t \in T \quad (29)$$

$$H_{i,t} \geq hd_{i,t}^{MIN} Z_{j,i,t} \quad \forall j \in J^{Heat}, i \in I^L, t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{i' \in I^M} P_{i',i,t} \leq \sum_{j \in J^{Pellet}} C_{j,i,t} \quad \forall i \in I^L, t \in T \quad (31)$$

$$\sum_{i' \in I^L} P_{i',i,t} \leq dem_{i,t} \quad \forall i \in I^M, t \in T \quad (32)$$

4 Caso de Estudio y Resultados

En los últimos años, diversos organismos han manifestado su interés en abordar proyectos que evalúen la potencialidad del aprovechamiento de la biomasa disponible para la producción de biocombustibles y la cogeneración de energía en algunos departamentos de la provincia de Entre Ríos, la cual cuenta con una gran cantidad y variedad de recursos biomásicos, con accesibilidad continua durante todo el año y que se pueden almacenar a la intemperie sin deterioro, transportar y chipear fácilmente. Estos proyectos pretenden evaluar alternativas de cogeneración de energía a partir de biomasa forestal, considerando la cadena de suministro, las tecnologías, la ubicación de las instalaciones, los consumos de biomasa y la capacidad de producción de energía eléctrica y vapor. Para dar respuesta sobre la viabilidad económica de este tipo de proyectos, el modelo de optimización propuesto fue aplicado para resolver un caso de estudio que considera la estructura y características de la cadena foresto-industrial en la provincia de Entre Ríos. El principal polo maderero de la región se ubica sobre la costa del Río Uruguay, en cercanías de los departamentos de Federación, Concordia y Colón. De

esta manera, como potenciales ubicaciones para las plantas de conversión, se seleccionan 3 Parques Industriales, uno instalado en cada departamento, ya que allí funcionan una gran variedad de empresas que pueden llegar a requerir el vapor que se produzca para sus procesos. La biomasa forestal puede ser obtenida a partir del desarrollo de plantaciones dendroenergéticas o de la compra de los subproductos en los aserraderos cercanos. En Entre Ríos, hay aproximadamente 145.000 ha forestadas, principalmente de la especie *Eucalyptus grandis*, que se concentran en una franja de 30 km de ancho al oeste del Río Uruguay y de unos 200 km de largo. A través del uso del Sistema de Información Geográfico QGIS se realizó un análisis sobre la disponibilidad de sitios destinados a explotación forestal que se localizan en cercanías (10, 20 y 30 km) de las 3 posibles plantas de conversión. Los resultados se muestran en la Figura 2.

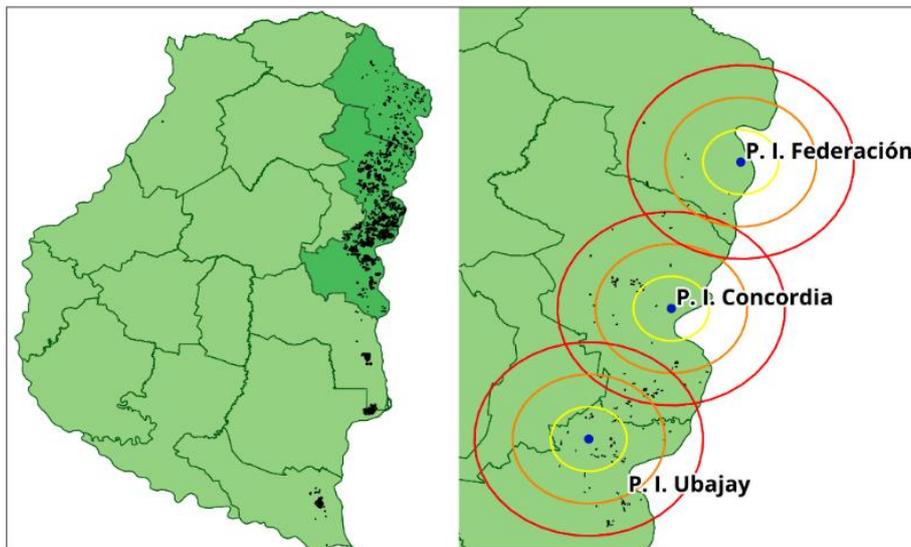


Fig. 2. Disponibilidad de sitios con potencial para plantaciones dendroenergéticas en ER.

En el mapa ubicado a la izquierda de la Figura 2, se presenta la distribución de los rodales forestales en los departamentos de Federación, Concordia y Colón, mientras que en el mapa ubicado a la derecha se localizan solamente aquellos de tamaño igual o mayor a 20 ha y menor a 30 ha, localizados a 10 km (dentro del círculo amarillo), 20 km (dentro del círculo naranja) y 30 km (dentro del círculo rojo) alrededor de las potenciales plantas de conversión a instalar. Por medio del QGIS, se identificaron 16 potenciales rodales para su aprovechamiento con fines dendroenergéticos, cada uno con un tamaño de entre 20 y 30 hectáreas (exceptuando un rodal en Federación de 18,6 ha, puesto que existe una menor disponibilidad en esa región). En principio, para el manejo de los rodales, se utiliza el modelo productivo recomendado por [2] como potencialmente aplicable a la región estudiada. Se considera el uso de la especie *Eucalyptus Grandis*, con una densidad inicial de 2.500 plantas/ha, y con controles de hormigas y malezas durante los 24 meses siguientes a la plantación. Se determina un ciclo

productivo de 14 años con dos turnos de corta cada 7 años, y cuyos rendimientos se estiman en 120 t/ha de materia seca en el primer aprovechamiento, con una pérdida del rendimiento del 15% en el segundo turno de corta. Los costos de establecimiento y manejo del rodal se computan en USD/ha, mientras que los costos de cosecha se estiman en USD por tonelada, información extraída de los reportes del INTA [7]. Además, se identificaron en las cercanías de las 3 potenciales plantas de conversión 29 aserraderos con capacidad de suministrar por año un promedio de 592 toneladas de biomasa, principalmente en forma de chips de madera, aserrín y virutas. Los precios de referencia para la compra de estos subproductos son publicados periódicamente por el INTA Concordia [8]. No obstante, se podrían evaluar precios de compra más competitivos para evitar que los aserraderos lo vendan a otras empresas (de celulosa y de tableros de fibra y partículas) que también usan estos subproductos como materia prima en sus procesos.

El transporte de la biomasa hasta las plantas de conversión se realiza utilizando camiones. La costa del Río Uruguay posee una densa red de infraestructura vial pavimentada con niveles de accesibilidad por encima del 70% a las potenciales fuentes de suministro de biomasa. Con el uso de QGIS, se calculó la distancia entre dichas fuentes de suministro y las plantas de conversión. Para la transformación de la biomasa en energía, se evalúan 23 alternativas de conversión que incluyen: (i) la producción combinada de energía térmica y eléctrica, mediante gasificación (implica un gasificador y un motogenerador) y/o combustión (Ciclo Rankine - CR); (ii) la producción de un tipo de energía: en el caso de la energía térmica se consideran calderas de biomasa, y en el caso de la energía eléctrica se considera el CR, y (iii) la producción de biocombustibles (pellets). Para la producción de bioenergía, se evalúan tecnologías con capacidad de 1, 2, 3 y 5 MW; en el caso de la producción exclusiva de energía térmica, se evalúan las capacidades de 0,5, 2, 3 y 5 MW. Para los pellets, se valoran procesos con capacidad de producción de 0,3, 2 y 4 toneladas/hora. Se asume que la energía producida se puede inyectar a la red o venderse a otras industrias cercanas. Para la distribución de los biocombustibles, se consideran 4 mercados de consumo regional. Los precios de compra y venta son expresados en USD/MWh o USD/ton, según corresponda.

El algoritmo de optimización fue desarrollado en GAMS y ejecutado en una PC con 8 GB de RAM y 8 núcleos con 16 hilos a 2.9 GHz, utilizando GUROBI como resolutor MIP. Para el caso de estudio propuesto, considerando un horizonte de planificación de 20 años y una tasa de descuento del 10%, se obtiene una solución de VAN = 42.696.934,73 USD después de 352 segundos de cómputo.

El modelo propuesto selecciona como alternativa óptima la instalación, en el Parque Industrial (P. I.) de la Ciudad de Concordia, de una planta de cogeneración de energía (eléctrica y térmica) en base a la tecnología de combustión utilizando el Ciclo Rankine, con una capacidad máxima de 5 MW. Respecto a la planificación forestal, tal como se observa en la Figura 3, se utilizan los 16 rodales disponibles para la producción de biomasa forestal. La mayoría de los rodales ubicados a 30 km a la redonda del P.I. de Concordia se establecen en el período T1 (7). Los demás rodales se establecen en el periodo T2 (7) y T3 (2). El costo por tonelada de biomasa producida resulta en 15 USD. Este valor representa el cociente entre la suma de los costos de establecimiento, manejo y cosecha de rodales y las toneladas cosechadas.

R	DISTANCIA AL P.I. CONCORDIA (km)	SUPERFICIE (ha)	PLANTACIÓN			PRIMERA COSECHA			SEGUNDA COSECHA		
			T1	T2	T3	T8	T9	T10	T15	T16	T17
R1	74,90	20,30									
R2	72,30	18,62									
R3	84,20	25,60									
R4	43,00	29,00									
R5	35,40	27,40									
R6	40,40	29,40									
R7	19,60	27,10									
R8	13,50	22,50									
R9	31,10	28,00									
R10	27,40	27,60									
R11	32,10	27,10									
R12	31,50	22,60									
R13	55,30	29,60									
R14	51,20	25,60									
R15	69,30	28,60									
R16	41,70	23,00									

Fig. 3. Planificación forestal dendroenergética para abastecer a la planta de conversión.

En cuanto a los aserraderos, tal como se observa en la Tabla 1, estos suministran 1.030.437,46 toneladas de subproductos en todo el horizonte de planificación, siendo este valor correspondiente al 99% de la oferta de biomasa disponible. Se evidencia que, al ser considerablemente inferior el precio de compra de los subproductos respecto al costo de producción de la biomasa, conviene utilizar la mayor cantidad de materia prima suministrada por estos, y lo restante obtenerlo a partir de las plantaciones dendroenergéticas.

Tabla 1. Suministro desde los aserraderos durante el horizonte de planificación.

Subproductos	Precio (USD/ton)	Total suministrado (ton)	%
Chips de madera	5,45	666.485,40	65
Aserrín	4,60	286.115,26	28
Viruta	3,50	77.836,80	7
Total	-	1.030.437,46	-

En la Figura 4 se muestran los niveles de producción de energía eléctrica y térmica (ambos en MWh) para cada año del horizonte de planificación. Se encuentra diferenciada la cantidad de energía producida que se destina al consumo interno de la cantidad de energía que queda disponible para la venta. En la misma gráfica, se puede observar también como resulta el abastecimiento de biomasa tanto desde las plantaciones dendroenergéticas como desde los aserraderos a lo largo del horizonte de planificación.

Nótese que los puntos máximos de toneladas suministradas desde las plantaciones dendroenergéticas se corresponden con los años de cosecha. El costo final de producir 1 MWh de energía (térmica y eléctrica) es de 34 USD.

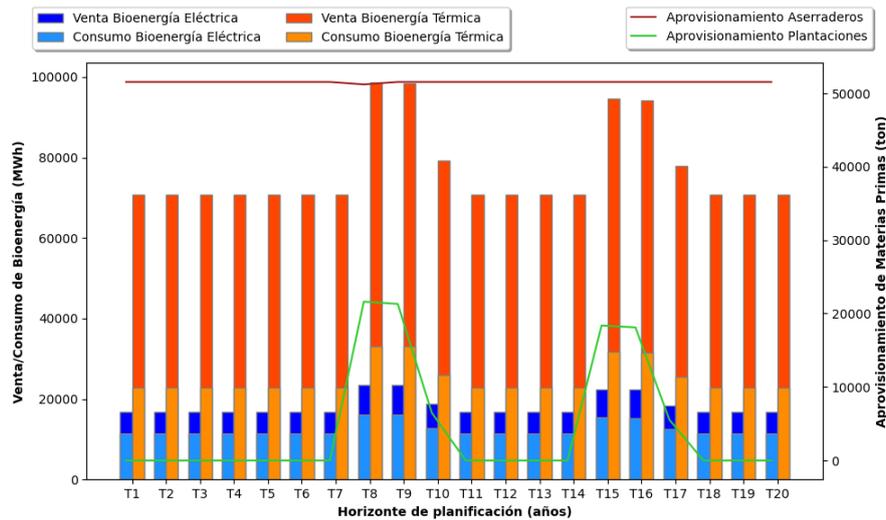


Fig. 4. Venta/Consumo de Bioenergía y Suministro de Materias Primas.

A partir de los resultados obtenidos, surge la necesidad de evaluar a futuro la posibilidad de pagar un precio mayor a los aserraderos por los subproductos, dado que el valor de producir una tonelada de chip de madera a partir de las plantaciones dendroenergéticas es de 15 USD, mientras que la misma cantidad proveniente desde los aserraderos tiene un valor de 5,45 USD. De esta manera se puede incentivar a los aserraderos a almacenar y comercializar sus subproductos, reduciendo problemas de plagas y contaminación, mejorando su margen de ganancias, y permitiendo una planificación a largo plazo considerando un comprador estable. Además, los aserraderos no asumen los costos de transporte. El conjunto de aspectos mencionados representa un incentivo para los aserraderos al momento de vender los subproductos que generan. Finalmente, considerando el cálculo del VAN para cada año del proyecto, la tasa de descuento mencionada (10 %) y el costo de inversión inicial, se obtiene (en forma aproximada) que en el año 10 se recupera la inversión, suponiendo que la misma surja de fondos propios de quienes desarrollan el proyecto. Sin embargo, diversos organismos están dispuestos a otorgar créditos con bajas tasas de interés para proyectos tales como el propuesto en este trabajo, que puede generar beneficios ambientales y aportar 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”. En caso de obtener un crédito, se espera que en años previos al año 10 se recupere la inversión.

5 Conclusiones

Este trabajo presentó un modelo MILP para dar soporte a la toma de decisiones en la planificación estratégica de la cadena de suministro de la biomasa forestal considerando el desarrollo de plantaciones dendroenergéticas. El modelo fue aplicado en un caso de estudio para verificar su validez y aplicabilidad. Considerando que el propósito de la producción de biocombustibles y bioenergía no puede limitarse únicamente a la rentabilidad económica, como próximo objetivo de trabajo se plantea extender el modelo hacia un enfoque multiobjetivo que tome en consideración también aspectos medioambientales y sociales.

Agradecimientos. Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional y al CONICET por la financiación recibida a través de los Proyectos PID UTN SIECCU0008601 y PIBAA 2872021010 0051CO.

Referencias

1. Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación. (2017). *Censo nacional de aserraderos: Informe del relevamiento censal en la provincia de Entre Ríos - Región Mesopotámica*. Ministerio de Agroindustria de la Nación.
2. 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>
3. Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., & González-García, S. (2015). *Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile*. *Journal of Cleaner Production*, 99, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>
4. FAO. (2020). *Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 18*. Buenos Aires. <https://doi.org/10.4060/ca8031es>
5. Pio, D. T., & Tarelho, L. A. C. (2021). *Industrial gasification systems (>3 MWh) for bioenergy in Europe: Current status and future perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111108. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111108>
6. Vera, D., Jurado, F., Torreglosa, J. P., & Ortega, M. (2018). *Biomass gasification for power generation applications: a modeling, economic, and experimental study*. *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, 2, 87-121. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813185-5.00003-6>
7. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Ministerio de Economía. (2023). *Boletín de precios de productos y servicios forestales: Zona centro y sudoeste de Corrientes*. Recuperado de https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/15653/INTA_CRCorrientes_EEABellaVista_Genes_et_al_Precios_prod_serv_ftales.pdf?sequence=1&isAllowed=y
8. INTA EEA Concordia. (enero, 2024). *Planilla de precios forestales - NE de Entre Ríos. Eucalipto y pino (Eucalyptus grandis; Pinus elliotti y/o Pinus taeda). Precios sin IVA*. Recuperado de https://drive.google.com/file/d/1V6UZ6FnXCcRZgRjVbltelZz5fanR7Zol/view?usp=drive_link