

Modelos de Planificación Forestal Orientados a la Producción y Logística

Juan José Troncoso T.
jtroncot@puc.cl
Departamento de Ciencias Forestales

La planificación forestal se caracteriza, al igual que en otras industrias, por tener una serie de decisiones interdependientes que difieren tanto en el nivel donde se deciden como en la importancia y plazo en el que deben definirse. Lo anterior permite identificar tres niveles de planificación, el estratégico, el táctico y el operativo, donde cada uno de ellos requiere de una gran cantidad información con distintos grados de certidumbre. Por todo ello, se hace necesario el apoyo en sistemas y/o modelos que faciliten la elección de un conjunto de decisiones que conformarán un plan determinado y que guiarán la gestión de la empresa.

Con respecto a la *Planificación Estratégica*, ésta consiste en un proceso de toma de decisiones anticipativo, destinado a generar cambios e innovaciones como resultado del análisis de las ventajas y debilidades internas de la empresa, y de las oportunidades y riesgos externos que se presentarían en el futuro, con un horizonte de planificación de largo plazo. Dentro de las decisiones tomadas a este nivel se encuentra el establecimiento de políticas globales de manejo forestal y adquisición de recursos, en función del estado del patrimonio, de las demandas proyectadas para los diferentes bienes y servicios del bosque, y de las condiciones técnico-legales que regulan su utilización. Su objetivo es definir un esquema de producción indicativo en función del estado del patrimonio forestal de la empresa y de las demandas proyectadas para los diferentes mercados.

La *Planificación Táctica*, por su parte, define en base a las orientaciones del nivel estratégico, un esquema de aprovechamiento del recurso forestal que permita evaluar, con mayor precisión, las actividades e inversiones requeridas (compra de predios, habilitación de caminos y canchas, selección de maquinaria, etc.), y con ello gestionar la empresa en concordancia con los objetivos de largo plazo.

Por último, la *Planificación Operativa* establece la programación detallada de las actividades que se ejecutarán en el corto plazo (como la elección de maquinaria de cosecha, licitación de faenas, contratación de mano de obra, etc.) con el fin de cumplir con los requerimientos de los clientes y con las restricciones ambientales y técnicas de la manera más eficiente posible.

No obstante, y para cualquier nivel de decisión, el uso de modelos de planificación ha facilitado los procesos de toma de decisiones, mejorando la gestión tanto productiva como económica de la empresa forestal. En este sentido, la técnica más usada como herramienta para la planificación forestal ha sido la Programación Matemática. Esta técnica ha dado buenos resultados en la mayoría de las empresas forestales chilenas, generando principalmente una disminución de los costos involucrados en las operaciones forestales. Su éxito se debe a la adaptabilidad de los modelos de optimización a un amplio rango de problemas, que varían con el tipo de empresa (estatal o privada), con el entorno ecológico (plantaciones o bosque nativo) y con el enfoque de interés (estratégico, táctico u operativo). Dentro de los modelos de optimización, los mo-

delos de Programación Lineal y de Programación Entera son las más utilizados.

Modelos de Planificación Estratégica

En el ámbito forestal y a nivel mundial, la planificación estratégica no cuenta con muchas herramientas que permitan tomar decisiones de producción y de abastecimiento de plantas industriales, situación bastante distinta para la planificación táctica y operativa, donde una gran cantidad de modelos apoyan las decisiones de producción, transporte y caminos forestales.

Como ejemplo se puede mencionar el sistema FORPLAN creado por el Servicio Forestal de E.E.U.U., que permite optimizar las decisiones relacionadas con la generación y aplicación de esquemas de manejo y cosecha al patrimonio de bosques estatales. Este sistema actualmente tiene la capacidad para manejar ecosistemas complejos entregando escenarios de planificación tanto tácticos como estratégicos, facilitando con ello también el manejo de áreas silvestres.

Otro modelo existente es el denominado FOLPI, desarrollado en Nueva Zelandia, y cuya principal característica es que permite realizar diferentes análisis sin necesidad de tener experiencia en programación lineal. Además, puede incorporar externalidades a las situaciones de manejo forestal y la evolución en el tiempo de las proyecciones de oferta y demanda de productos generados por el bosque. En la actualidad, FOLPI es utilizado por el Servicio Forestal Neocelandés y las empresas forestales de ese país para la planificación

estratégica de actividades de manejo, asignación de productos y valoración de bosques, tanto a nivel de predios como a nivel regional y nacional.

En nuestro país, algunas empresas forestales utilizan el modelo de planificación estratégica MEDFOR. Este sistema apoya principalmente las decisiones de establecimiento de políticas de manejo forestal y de abastecimiento a las plantas industriales, garantizando una producción sostenida durante los 50 años del horizonte de planificación.

La gran desventaja de todos estos modelos de planificación estratégica, es que ninguno integra las decisiones de manejo y producción forestal con las de localización de instalaciones o plantas industriales, y por lo tanto no permiten la planificación de la *Logística* en forma conjunta con la producción forestal, elemento clave para empresas forestales verticalmente integradas, como aquellas existentes en Chile.

La logística en la industria forestal

Cuando se analiza la Logística de cualquier industria, es posible identificar que los problemas claves en dicho proceso son el Problema de Localización de Instalaciones (PLI) y el de Distribución de Carga (PDC). La logística se puede definir como el proceso de manejar estratégicamente el movimiento y almacenamiento de materiales, partes, y productos finales, desde las fuentes abastecedoras hacia la planta y desde ésta hacia los clientes. La logística está entonces relacionada con el manejo del flujo físico que comienza en las fuentes de oferta y termina en los puntos de consumo, considerando decisiones de localización de instalaciones, niveles de inventario, administración de materiales y sistemas de información, y el transporte.

No obstante, y previo a la operación de la logística, es la producción la encargada de generar la carga que deberá moverse entre todos los actores del sistema de distribución. En la industria forestal existen dos fuentes productoras o generadoras de carga. Primero están los bosques, quienes

abastecen con la madera necesaria a la instalación localizada para fabricar los distintos tipos de productos. Y segundo, la instalación o planta que elabora los productos terminados en función de las demandas reales y/o proyectadas.

Con respecto al PLI, éste es uno de los problemas clásicos que ha sido estudiado por la Investigación de Operaciones, el cual consiste simplemente en un problema de asignación espacial de recursos, cuyo objetivo es ubicar plantas para optimizar un objetivo implícito o explícito, geográficamente dependiente. Si se analiza la literatura existente en el tema, las instalaciones o plantas que se localizan generalmente abarcan decisiones estratégicas que buscan minimizar un costo económico o maximizar algún indicador de bienestar social.

La formulación matemática típica para un PLI considera la ubicación de P nuevas plantas en cualquiera de los Q sitios disponibles ($Q \geq P$). Las nuevas instalaciones se relacionarán con los R clientes existentes. El objetivo es localizar las instalaciones para minimizar el costo total de transporte entre las plantas y los clientes.

El PLI y la Planificación Estratégica

En la mayoría de los sectores donde deben tomarse decisiones de localización de alguna nueva planta o de expansión de las existentes, se considera este tema como estratégico y clave para cumplir con el objetivo social y/o económico fijado por la empresa o institución.

Al respecto, gran parte de la literatura establece que las decisiones de localización de instalaciones están en un nivel estratégico, y que están asociadas a los ejecutivos de más importancia en cualquier empresa; esto debido principalmente a los altos montos de inversión que la construcción de plantas significa. Por ello, las cuatro preguntas claves que deben responder los modelos matemáticos desarrollados para resolver los problemas de localización, son:

1.- ¿Cuántas instalaciones deben ser construidas?

2.- ¿Dónde debe localizarse

cada una de las instalaciones?

3.- ¿Qué tamaño debe tener cada instalación?

4.- ¿Cuánta demanda debe ser asignada a cada una de las instalaciones?

Obviamente el número de instalaciones a localizar así como el tamaño de cada una de ellas depende generalmente de las **curvas de tradeoffs** entre servicio y costos. En muchos casos, la calidad del servicio mejora a medida que aumenta el número de instalaciones, pero aumenta el costo de proveer el servicio. En general, frente a la interrogante de dónde localizar una instalación dada, la mayoría de los autores coincide en que son los costos de transporte (actuales y futuros) los más influyentes en la decisión final.

Por otra parte, con respecto al tema de la planificación estratégica de las instalaciones, para guiar dicho proceso en la literatura es frecuente encontrar un esquema de planificación compuesto por seis etapas:

1.- Definición de la capacidad de la instalación.

En esta etapa debe definirse la tasa máxima de producción. Como se trata de una tasa de salida, la capacidad debe ser expresada en unidades producidas por unidad de tiempo.

2.- Pronosticar las demandas futuras.

Una vez definida la capacidad máxima de producción, corresponde realizar las estimaciones de las demandas futuras que tendrá la planta o instalación. Dentro de las técnicas recomendadas para realizar estas predicciones, destacan los métodos causales y los modelos de series de tiempo.

3.- Determinar las necesidades de la instalación.

Después de haber proyectado las demandas, es necesario definir para cada periodo del horizonte de planificación, las necesidades de recursos productivos y de capacidad para cumplir con las demandas.

4.- Generar alternativas.

Posteriormente, deben generarse una serie de combinaciones de cantidad, ubicación y tamaño de las instalaciones, que permitan el cumplimiento en forma adecuada de las de-

mandas pronosticadas.

5.- Evaluar las alternativas.

Con la identificación de todas las alternativas posibles, se procede entonces a evaluar, generalmente en términos económicos, los beneficios netos de cada una de las opciones. Muchas veces es necesario implementar un modelo matemático que haga más fácil la tarea de evaluación.

6.- Decidir.

Por último, una vez conocidos los beneficios que generará cada una de las alternativas, corresponde a los ejecutivos de alto nivel tomar la decisión de cuál opción se implementará, basados obviamente en el cumplimiento de los objetivos preestablecidos por la empresa.

Modelos de Planificación Forestal basados en el PLI

En el área forestal las aplicaciones del PLI han sido bastantes escasas, pese a que su utilización permitiría principalmente la planificación estratégica del flujo de carga que se generará entre los centros de oferta (bosques) y la planta procesadora, y entre la planta y los centros de demanda.

Una de las primeras modelaciones basadas en dicho problema es un modelo de programación entera que permite asignar áreas a ser cosechadas por determinados sistemas de cosecha localizados en las canchas que el mismo modelo decide construir. El modelo se transforma en un PLI con costo fijo. Para solucionar el problema, se desarrolla una heurística denominada «Cascada». Su nombre se explica porque se desarrolló para resolver un problema de localización con una estructura especial, denominada estructura de *costo fijo en cascada*.

Otro modelo desarrollado analiza la localización de plantas para la fabricación de tableros OSB (Oriented Strandboard). En esta aplicación se desarrolla un programa computacional que integra un modelo estático de programación mixta que determina la localización y tamaño óptimos de una planta de OSB, con un modelo financiero que analiza la rentabilidad de la decisión entregada por el modelo matemático. El modelo desarrollado bus-

ca minimizar los costos de compra de la madera, los costos de transporte, los costos de capital y los de operación. Las restricciones principales son las de oferta de madera, demandas de los productos y disponibilidad de capital.

Otra aplicación existente implementa un algoritmo para determinar la localización óptima de una cancha de madereo para tractores forestales. El modelo supone que la cancha estará ubicada en terreno plano y uniforme, y que el movimiento de los tractores será en línea recta hacia la cancha. El objetivo final del algoritmo es minimizar los costos de madereo, para lo cual se asume que el costo variable es proporcional a la distancia.

Finalmente, una de las aplicaciones más recientes es la que realiza el autor para planificar estratégicamente la Producción y Logística en el sector forestal. En ella se genera un modelo de programación matemática para resolver en forma conjunta los problemas de *Producción Forestal* (PPF), *Localización de Instalaciones Forestales* (PLIF) y de *Distribución de Carga Forestal* (PDCF). Dicho modelo matemático, denominado *PROLOG*, pretende servir de base para las futuras inversiones en distintas plantas de transformación, apoyando principalmente las decisiones asociadas a la localización y tamaño óptimos de las instalaciones, y a la planificación global de la producción y transporte de productos forestales.

PROLOG: Un Modelo basado en el PLI

El modelo *PROLOG* formulado para resolver los tres problemas planteados anteriormente, corresponde a un modelo dinámico de programación mixta que considera variables de decisión enteras del tipo binarias (con valores 0 y 1), asociadas específicamente con la elección del sitio y tamaño de la instalación a construir, y a la expansión de la capacidad de producción. Junto a esas variables, también están las variables continuas que indican la superficie a cortar en cada rodal durante un período dado, así como la cantidad de madera comprada a terceros.

La función objetivo del modelo minimiza el valor actualizado de los costos totales de abastecimiento y transporte de madera, los costos de operación, los costos de transporte de productos y los costos fijos de expansión en el período que corresponda. Además, se suma la inversión asociada a la construcción de la instalación en cualquiera de los sitios disponibles.

Las principales restricciones están asociadas con la localización y capacidad de la instalación a construir; con la superficie cortada y los flujos de madera y de productos generados por período.

¿Qué resuelve PROLOG?

El problema que resuelve el modelo consiste en la planificación a largo plazo de la producción y logística de la industria forestal. Dicha planificación parte con la definición de dónde localizar y de qué tamaño construir una instalación forestal (IF), que puede ser un aserradero, una planta de celulosa, u otra planta de transformación mecánica; y donde cada una de ellas elabore un producto generalizado, es decir metros cúbicos de madera aserrada o toneladas de celulosa, por ejemplo. La decisión final de localización debe señalar la construcción de la o las IF en cualquiera de los sitios previamente definidos como posibles, los cuales están agrupados en tres clases: sitios en Zonas de Predios, sitios en Interzonas, y sitios en Zonas de Demanda (Figura 1).

Por otra parte, además de definir el lugar y el tamaño de la instalación, también determina si es necesaria una expansión de la capacidad instalada en cualquiera de los 20 períodos de planificación (de un año cada uno). La idea es permitir que siempre se pueda satisfacer la demanda de productos pronosticada a mínimo costo total.

Unido a los problemas anteriores está el de cuantificar la producción de madera, identificando los niveles de cosecha o extracción por período en cada uno de los rodales que posea la empresa, con el objeto de abastecer a la IF con la cantidad de madera necesaria para producir el volumen de producto demandado. Eventualmente,

y en caso de que la oferta propia de madera sea insuficiente en cualquiera de los períodos, se puede realizar la compra de madera a terceros.

Finalmente, también planifica la distribución de carga forestal, identificando los distintos flujos de madera y de productos que se generarán entre los diferentes pares origen-destino en cada período, de modo que se pueda planificar el transporte global de carga forestal desde los bosques hacia la IF y desde ésta hacia los centros de demanda.

Validación de PROLOG

Para validar el modelo desarrollado, esto es, para verificar la aplicación práctica de sus resultados, se procedió a resolver un problema de tamaño real que implicaba la localización de un nuevo aserradero en la VIII Región de Chile. La solución debía entregar la decisión de dónde y de qué tamaño se construiría el aserradero, y cuáles serían las producciones y los flujos de madera aserrable y aserrada en todos los períodos del horizonte de planificación (20 años). Los lugares candidatos para localizar el aserradero estaban conformados por un conjunto de 20 predios forestales, 10 puntos intermedios y 4 centros de demanda.

Una vez resuelto el problema, la solución óptima del modelo indicó la

construcción del aserradero en uno de los predios de la empresa ubicado a 150 km. del puerto de San Vicente, principal punto de demanda. El aserradero a construir, en base a las demandas pronosticadas, tiene una capacidad de producción anual de 250.000 m³ de madera aserrada. Además, debido a un incremento de las demandas a partir del quinto año, y las cuales en total superan la capacidad inicial, se amplía la capacidad de producción en 20.000 m³/año, en el cuarto año.

Por otro lado, en cuanto al abastecimiento con madera aserrable, el modelo sólo aprovecha el patrimonio de la empresa forestal considerada para tal efecto, práctica habitual de la mayoría de las empresas chilenas verticalmente integradas, quienes se abastecen en un 100% con madera propia.

Consideraciones Finales

En el ámbito forestal, la modelación matemática de los problemas de planificación estratégica se ha dirigido principalmente a la determinación de los esquemas de manejo que deben aplicarse a cada predio o rodal forestal, con tal de maximizar el Valor Presente Neto proveniente del aprovechamiento del patrimonio. En este sentido, las principales decisiones han sido las de superficie a cortar por pe-

ríodo y los flujos de madera para abastecer a alguna planta industrial, sin embargo, no han considerado las de localización de instalaciones forestales, decisiones fundamentales a la hora de planificar estratégicamente la producción y logística de cualquier empresa.

La utilización del Problema de Localización de Instalaciones como base para generar modelos de planificación forestal ha sido muy escasa pese a la gran cantidad de ventajas que trae consigo el uso de este tipo de modelos, principalmente para apoyar las decisiones de ubicación óptima de plantas, transporte de carga y producción de madera. No obstante, el tema de la localización de instalaciones es bastante amplio y requiere de una correcta clasificación para identificar qué tipo de formulación es la más adecuada para aplicarla a algún caso particular.

Con respecto al modelo PROLOG, este sistema permite localizar cualquier tipo de instalación forestal y ampliar dinámicamente su capacidad de producción. Esto otorga una mayor flexibilidad y disminuye la posible subutilización de los equipos. Además, todas las decisiones tomadas por el modelo son técnicamente ejecutables y mejorarían la planificación de la producción y logística de cualquier empresa.

Finalmente, se puede señalar que la utilización de este tipo de modelos va a ser necesaria en el corto plazo por parte de las empresas forestales chilenas, ya que si se analiza la disponibilidad de madera proyectada hasta el año 2027, se requerirá la construcción de nuevas instalaciones, en especial, plantas de transformación mecánica (Aserraderos, Plantas de Tableros y Chapas, Plantas de Remanufactura, entre otras), debido a que la madera aserrable disponible se duplicará hacia el año 2003 y casi se triplicará para el trienio 2025-2027. Esto último requerirá obviamente de decisiones estratégicas bien fundamentadas, pues se deberá disponer de la capacidad instalada que permita procesar toda esa madera, y a la vez, comercializarla en el mercado internacional transformada en productos con alto valor agregado.

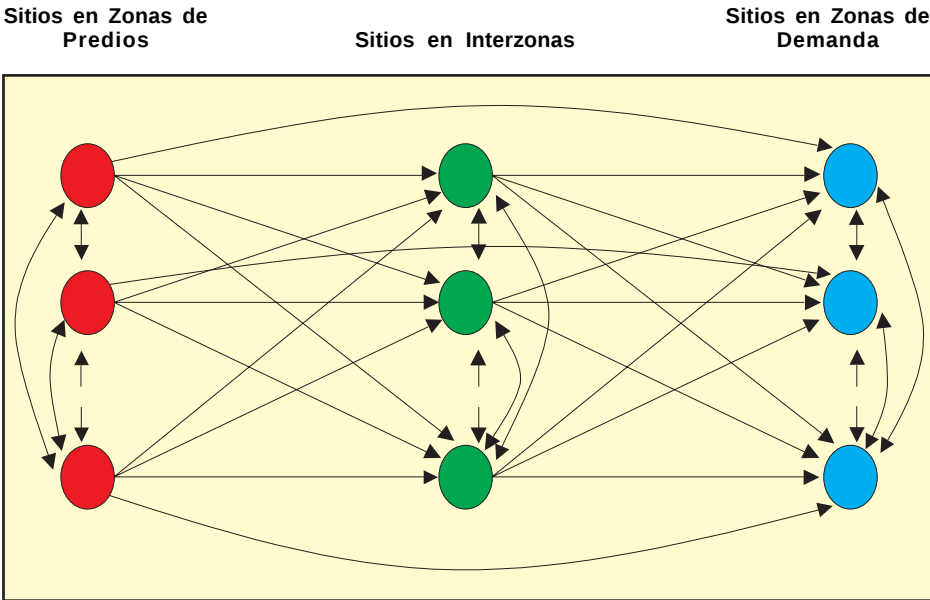


Figura 1. Red de Sitios Disponibles usada por PROLOG