

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – CHILE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Un modelo de optimización para el uso de grúas y el transporte de
rollizos en una empresa forestal Chilena.**

por

Philippe Gerard Passicot Guzmán

Profesor Guía:

Dra. Lorena Pradenas Rojas

Concepción, Abril de 2015

Tesis presentada a la

**DIRECCIÓN DE POSTGRADO
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**



Para optar al grado de

MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

RESUMEN

Un modelo de optimización para el uso de grúas y el transporte de rollizos en una empresa forestal Chilena.

Philippe Passicot

“Abril de 2015”

PROFESOR GUIA: Lorena Pradenas.

PROGRAMA: Magíster en Ingeniería Industrial.

En el presente trabajo, se desarrolló un modelo de programación matemática como la primera propuesta de solución al problema de asignación de grúas de carguío y transporte de rollizos de madera. Para la modelación del problema, se utilizó el *software* GAMS y para la resolución se utilizó el *software* CPLEX.

Se generó una interfaz con el *software* EXCEL, tanto para la carga de datos y parámetros como para los resultados de cada corrida. Esto permite, que los datos de entrada y los parámetros para el modelo, puedan ser cargados y modificados de manera rápida y los resultados puedan ser analizados de forma amigable y con todas las herramientas que entrega el *software* EXCEL

El modelo se aplicó en una empresa forestal chilena bajo múltiples escenarios y se logró obtener resultados en tiempos computacionales aceptables, en relación a los requeridos.

Palabras Claves: Optimización, modelo matemático, transporte de rollizos, asignación de grúas.

ABSTRACT

A optimization model for the use of cranes and transport of logs in a Chilean forestry company.

Philippe Passicot

“April 2015”

THESIS SUPERVISOR: Lorena Pradenas.

PROGRAM: Master in Industrial Engineering.

The present work, develop a mathematical programming model to solve the crain assignation and log transportation problem in the forest supply chain. To model the problem was used the software GAMS and to solve the model was used the software CPLEX.

An interface with software EXCEL was create, both for loading data and parameters to the results of each run was generated. This allows the input data and parameters for the model, can be loaded and modified quickly and the results can be analyzed with all tools that delivers EXCEL software.

The model was applied in a Chilean forestry company under multiple scenarios and managed to get results in acceptable computational times, in relation to required by the forestry company

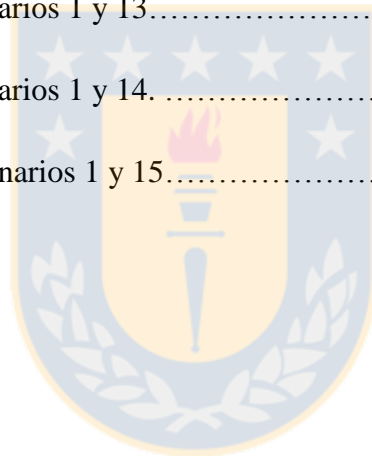
Keywords: Optimization, mathematical programming model, log transportation, crane assignation.

ÍNDICE

CAPÍTULO I Introducción	
1.1 Introducción	4
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivo General.....	4
1.4 Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II Descripción del problema	
2.1 Antecedentes generales del problema.....	5
2.2 Sistema de producción, despacho y transporte de rollizos.....	6
2.3 Programa de venta y su operación diaria.....	7
CAPÍTULO III Estado del arte y revisión bibliográfica	
3.1 <i>Multi-commodity supply network planning in the forest chain</i>	9
3.2 <i>Supply chain management in Forestry – case studies at Sodra Cell AB</i>	11
3.3 <i>Optimal forest transportation with respect to road investments</i>	14
3.4 <i>Supply chain modelling of forest fuel</i>	19
3.5 <i>A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain – A case study in the Chilean forest industry</i>	25
3.6 <i>Forestry optimization</i>	31
CAPÍTULO IV Materiales y método	
4.1 Modelamiento matemático.....	37
4.1.1 Conjunto de índices del modelo.....	37
4.1.2 Parámetros del modelo.....	38
4.1.3 Variables de decisión del modelo.....	39
4.1.4 Modelo matemático	40
4.2 Escenarios de prueba.....	45
CAPÍTULO V Resultados	
5.1 Resultados.....	48
CAPÍTULO VI	
6.1 Conclusiones.....	57
CAPÍTULO VII	
7.1 Referencias.....	58

Tablas

Tabla 1: Resumen del tamaño del problema.....	26
Tabla 2: Escenarios de prueba utilizados.....	45
Tabla 3: Resultados escenarios 1 y 2.....	48
Tabla 4: Resultados escenarios 1, 3 y 4.....	49
Tabla 5: Resultados escenarios 1, 5 y 6.....	50
Tabla 6: Resultados escenarios 1, 7, 8, 9 y 10.....	51
Tabla 7: Resultados escenarios 1, 11 y 12.....	52
Tabla 8: Resultados escenarios 1 y 13.....	54
Tabla 9: Resultados escenarios 1 y 14.....	55
Tabla 10: Resultados escenarios 1 y 15.....	56



Figuras

Figura 1: Esquema general del problema.....	6
Figura 2: Problema del viaje de retorno.....	13
Figura 3: Rutas inaccesibles durante la primavera.....	16
Figura 4: Demanda de bio energía en Suecia.....	23
Figura 5: Balance de cargas durante los primeros 4 periodos.....	42



CAPÍTULO I Introducción

1.1 Introducción

La cadena logística del área de la producción forestal es muy compleja y diferente a las cadenas logísticas de las empresas manufactureras tradicionales. Por ejemplo, la cadena de suministro de trozos a las plantas industriales de: aserrío, celulosa y paneles debe considerar una serie de decisiones de nivel estratégico como, la asignación de manejo a los diferentes bosques, construcción de caminos principales para dar acceso a los bosques y la construcción de campamentos forestales. También debe considerar decisiones de nivel táctico, por ejemplo ¿Que bosques deben ser cosechados durante el próximo año? y la construcción de caminos secundarios para dar acceso a los bosques y también decisiones de nivel operativo o de corto plazo como la asignación de una línea de producción específica a un bosque, definición del patrón o esquema de trozado para cada bosque y la asignación detallada de volumen por cada tipo de trozo a cada planta industrial. Adicionalmente determinar los suministros de productos de la cadena es especialmente complejo y costoso, especialmente lo relacionado a los diámetros de los arboles a diferentes alturas además, la ubicación y diámetro de las ramas y nudos de cada árbol. Por esta razón la planificación forestal, en relación a la producción de trozos según calidad, diámetro y largo se realiza en escenarios con bastante incertidumbre donde, la calidad de información es baja.

1.2 Hipótesis

La hipótesis planteada en el estudio considera, que es posible optimizar la asignación de grúas (equipos de carguío) y el transporte de rollizos, mediante un modelo de programación matemática y los objetivos planteados son:

1.3 Objetivo General

Formular un modelo de programación matemática para la optimización del uso de grúas y el transporte de rollizos en una empresa forestal.

1.4 Objetivos Específicos

- Diseñar un modelo de programación matemática para optimizar.
- Generar un conjunto de instancias de prueba del modelo propuesto.
- Resolver el modelo propuesto mediante GAMS-CPLEX.

CAPÍTULO II Descripción del problema

2.1 Antecedentes generales del problema

Forestal Mininco S.A produce diariamente un promedio de 13.000 metros cúbicos de madera de pino radiata dispersa geográficamente en decenas de orígenes, que requiere transportar a cada una de las 42 plantas que consumen cada uno de los 8 diferentes productos. Cada planta presenta sus propias particularidades técnicas, las cuales se traducen en que sólo se puede consumir algunos de los 8 diferentes productos que presentan diferentes largos y diámetros de los trozos. En la figura 1, se presenta un esquema con los orígenes, productos, medios de carguío, transporte y destino.


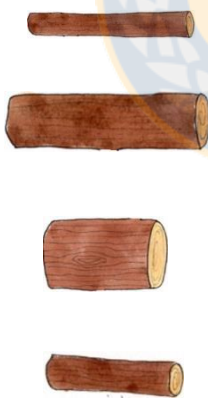

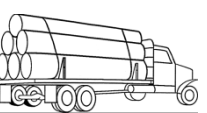
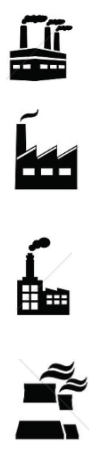
ORÍGENES	PRODUCTOS	CARGUÍO	TRANSPORTE	DESTINOS
Decenas de orígenes con dispersión geográfica de Talca a Loncoche.	8 productos según largo y diámetro trozos y ramas.	17 grúas móviles para el carguío de camiones.	Flota de Transporte con capacidad acotada.	En promedio 42 destinos.
				

Figura 1: Esquema general del problema.

Adicional a las decenas de orígenes de producción de madera es necesario, agregar los *stock* que se encuentran aún en orígenes sin producción activa y que no se han evacuado debido a múltiples situaciones entre las que se cuenta, la sobreproducción de un determinado producto por errores de las proyecciones de producción o el corte temporal de los caminos de acceso a un origen producto de malas condiciones climáticas.

2.2 Sistema de producción, despacho y transporte de rollizos

Las operaciones de producción de rollizos de madera, es continua durante todo el año y es habitual que existan un promedio de 44 fundos produciendo de manera simultánea. Cada fundo tiene bosques de diferentes edades y manejos lo que genera que cada fundo produzca una cantidad diferente de cada uno de los productos. Antes de ingresar a las líneas de producción, se realiza un inventario en pie del bosque, mediante un muestreo sistemático para estimar la calidad y cantidad de cada producto a obtener. Las operaciones de producción se realizan según la topografía del terreno que hace necesario ciertas líneas de producción específicas para extraer los árboles y obtener los diferentes productos. Cada línea tiene capacidades de producción distintas, que varían en un 100% desde la línea de menor producción y la línea de mayor producción. Sólo un tercio, de las líneas opera de manera continua durante los 30 días del mes y dos tercios de las líneas trabajan con sistema de turnos, teniendo días libres al inicio y a fin de mes. Esto genera que las producciones sean elevadas entre los días 7 y 15 del mes y entre los días 22 y 30. Las líneas de producción de rollizos operan de manera continua en sectores alejados de ciudades y en invierno es habitual que la lluvia y la nieve afecten drásticamente sus producciones, en especial las líneas que operan con torres de madero equipos necesarios, para extraer los árboles en sectores montañosos donde la laderas plantadas con *Pinus Radiata* superan el 45% de pendiente, ya que es necesario que al menos 3 operadores trabajen directamente al aire libre. Por el contrario, las altas temperaturas del verano también, afectan el rendimiento de estas líneas de producción y el polvo de los caminos secos en verano también afectan, el rendimiento de los equipos. Los niveles diarios de producción fluctúan fuertemente debido en gran parte a las condiciones mencionadas, a las que se suman las fallas que presenta toda línea productiva pero que en este caso muchas veces se extiende por lo difícil de obtener rápidamente los repuestos. Debido a todo lo expuesto es posible que las producciones presenten variaciones del 250% dentro de la misma semana lo que sumado, a las desviaciones que presentan los inventarios previamente realizados en los fundos, transforma a este sistema productivo en un sistema altamente complejo y extremadamente variable.

Diariamente, se realiza un programa de despacho de productos a cada destino final, el que considera: la ubicación de las grúas necesarias para el carguío de camiones; la cantidad necesaria de camiones para el transporte; la tasa de recepción de cada destino y las distancias entre cada par origen/destino. Al igual que la producción, este programa está sujeto a una serie de inconvenientes difíciles de predecir y que atentan contra el cumplimiento del

programa de despacho. Congestión en los fondos, rutas o destinos que aumentan los tiempos de todo el proceso de despacho, transporte o descarguio, fallas mecánicas de cualquiera de los cientos de equipos que participan en el proceso diario o la dificultad para llegar hasta la carga que se debe transportar, debido a la compleja red de caminos en el interior de cada fundo, hacen también que este proceso sea altamente variable en relación al cumplimiento del programa diario de despacho.

2.3 Programa de venta y su operación diaria

Quincenalmente, se genera un programa de venta o abastecimiento de rollizos para cada destino, considerando: la producción esperada durante los próximos quince días y los stocks disponibles; la demanda de madera de cada destino; la capacidad diaria de recepción y los costos de transporte para cada par origen/destino. Este programa considera la capacidad de carguío como volumen total, es decir que todo el volumen trasladado en la quincena puede ser cargado. Sin embargo, no realiza la asignación de una grúa en particular a un cierto destino, es decir no se programa los equipos de carguío, lo que ocurre posteriormente en el programa de despacho.

Debido a las múltiples razones antes expuestas, el mencionado programa de venta comienza a sufrir desviaciones propias de la operación de: cosecha, carguío, transporte y recepción de rollizos y día a día se toman decisiones para intentar corregir las desviaciones. Sin embargo, estas decisiones son tomadas sin un modelo de optimización formal y parametrizado que permita asegurar que la decisión tomada, responde al óptimo global o a la mejor solución del escenario planteado y a su vez evaluar y costear rápidamente, diferentes escenarios para negociar con los clientes.

La desviación más común que sufre el programa de venta quincenal, provienen de dos fuentes: la producción y el transporte.

En el ámbito de la producción, se producen desviaciones en el volumen generado de cada producto debido a que, los inventarios en pie de los bosques, usados para proyectar el volumen por producto a generar tienen, implícito un error de estimación propio de un inventario forestal el que muchas veces se incrementa debido a lo antiguo del inventario. Esto genera desviaciones tanto positivas como negativas del volumen generado por producto y que desvía la producción real, de la producción programada. Por otro lado, el transporte también genera desviaciones al programa de venta, ya que no se logra llegar a los clientes con el volumen diario comprometido debido básicamente a que el programa diario de despacho y

transporte se construye en dos secuencias independientes. Primero, se asigna una grúa de carguío a un cierto origen y luego en un proceso posterior, se decide que producto transportar desde un origen a un destino, considerando: Que volumen es factible de cargar debido a la previa asignación de grúas, las actuales desviaciones de abastecimiento en cada destino, los costos de transporte origen/destino y la utilización de la flota de transporte. Ambos procesos, por separado y secuenciales, restringen la zona de solución factible. Además, el hecho de considerar solo el volumen disponible en piso, sin el volumen a producir en los próximos días, puede generar soluciones con altos costos de transporte debido a la actual urgencia por trasladar volumen a un destino para el cual posteriormente podría estar disponible un volumen con un menor costo de transporte, es decir, es necesario considerar al menos 2 días de producción de manera de presentar alternativas de orígenes para el abastecimiento de los clientes.

Es importante también considerar, que las grúas de carguío en origen tienen una flexibilidad de movimiento acotada, por el tiempo limitado de desplazamiento entre cada uno de los orígenes debido a que un gran porcentaje de su tiempo, se encuentran en trabajos de carguío y también se debe considerar, que los operadores deben estar a una distancia de su base de operaciones que les permita regresar a pernoctar.

Enfrentar a diario y con tiempos de respuesta muy ajustados, un problema logístico, como el presentado e intentar encontrar, la mejor solución, que cumpla con cientos de restricciones que cambian día a día, sin usar un modelo de optimización que permita, asegurar que la decisión encontrada es la mejor solución global al problema y evaluar, de manera rápida y sistémica, diferentes soluciones y sus costos e impactos en el sistema, es prácticamente imposible.

Hoy en día, existen varios *software* computacionales para construir y resolver modelos matemáticos, que representen problemas reales en cualquier ámbito. Esto, sumado al avance en los computadores portátiles, permite resolver modelos matemáticos, altamente complejos, en pocos minutos y de esta manera disponer de tiempo para analizar la solución encontrada y eventualmente encontrar soluciones alternativas, modificando el escenario planteado y evaluando los impactos de manera rápida y sistémica, lo que asegura que cumplimos con todas las restricciones del problema y podemos contar con un abanico de soluciones factibles para tomar la decisión final con la mayor información posible.

CAPÍTULO III Estado del arte y revisión bibliográfica

A continuación se presentan diversos estudios relacionados con el tema:

3.1 Multi-commodity supply network planning in the forest chain.[1]

En este artículo se propone un modelo matemático entero mixto para planificar el suministro, de corto plazo, de trozos a las diferentes plantas de consumo que se encuentra dispersas geográficamente. Este problema considera que existen varios tipos de trozos distintos los cuales son demandados, en diferentes cantidades, por varios centros de consumo.

Los problemas de planificación de la cadena de suministro con múltiples productos han sido estudiados por muchos autores. El más común de los problemas de distribución de múltiples productos es cuando un subgrupo de plantas de consumo recibe solo alguno de los productos, generando un cierto nivel de demanda. Este tipo de problemas es usualmente representado por un conjunto de costos que consideran los costos de transporte y producción además de los precios de venta de cada producto. Este problema se vuelve complejo cuando existen restricciones de capacidad de las plantas.

En este estudio, los productos finales se producen directamente en el bosque en relación a la demanda de las plantas. El modelo planteado da respuesta a que unidades de bosque a cosechar, que productos fabricar y a que plantas llevarlos. Durante todo este proceso hay dos costos que juegan un rol importante. Primero el costo de cosecha y segundo el costo de transporte.

Debido a lo complejo del problema tratado, los autores tomaron la decisión de dividirlo en dos sub problemas para los cuales se presentan modelos matemáticos, que resueltos en forma secuencial dar respuesta al gran problema. El primer modelo considera grupos de productos, es decir las demandas y por consiguiente las producciones se consideran a nivel de grupo de productos, lo que permite reducir el tamaño del problema y lograr una solución en tiempos razonables en relación a los bosques que serán cosechados y con este problema resuelto el siguiente modelo considera el detalle de los productos y finalmente entrega respuesta a como abastecer las distintas demandas de trozos para cada planta al mínimo costo posible.

La resolución secuencial de ambos modelos debe decidir el volumen de cada producto a ser cosechado y luego transportado hasta alguna planta con el objetivo de minimizar el costo total que incluye el costo de cosecha y el costo de transporte. También consideran que los

costos de cosecha se incrementan proporcionalmente a la cantidad de productos generados en un determinado bosque, es decir, a mayor cantidad de productos mayor es el costo de cosecha. Por otra parte, el costo de transporte se incrementa linealmente con respecto al volumen a transportar y depende directamente de la distancia entre el origen (bosque) y la planta demandante.

Los autores desarrollaron una heurística particular y generaron 20 escenarios diferentes, los cuales se resolvieron tanto con la heurística programada en el software C++ como de manera exacta usando el software CPLEX. Cada una de las diferentes instancias plantearon diferentes escenarios en relación a la cantidad de bosques posibles de cosechar (de 2 a 4) la cantidad de plantas demandando productos (de 2 a 5) y la cantidad de productos (de 5 a 10).

Para problemas pequeños, con menos de 5 productos y menos de 4 bosques, tanto la heurística como CPLEX llegan a la solución óptima siendo CPLEX más rápido que la heurística. Para instancias mayores a 4 bosques, 5 plantas y 5 productos se definió un tiempo máximo de iteración de 1.000 segundos. Para cada una de los 50 problemas resueltos en instancias iguales o superiores a las descritas CPLEX, obtuvo mejores resultados, expresados en funciones objetivos con menor valor.

En conclusión, el artículo presenta un problema de la cadena logística del área forestal con múltiples productos. Se desarrollan dos modelos matemáticos entero mixto que trabajan de manera secuencial para dar respuesta al problema. La desarrolla una heurística especial la cual se compara en tiempos y calidad de resolución con respecto a resolver de manera exacta. Ambos métodos permiten encontrar soluciones exactas en instancias pequeñas y también encuentran buenas soluciones factibles en instancias mayores.

3.2 Supply chain management in Forestry – case studies at Sodra Cell AB. [2]

Los autores mencionan que, la gestión de la cadena de suministros y la optimización han tenido un fuerte desarrollo en la industria forestal durante los últimos años. El flujo de madera comienza desde el bosques decidiendo: la cosecha, el trozado de los árboles, el ordenamiento de los diferentes productos y el transporte hacia los diferentes centros de consumo que pueden ser: aserraderos, plantas de celulosa, tableros o plantas de bioenergía que producen diferentes productos como madera aserrada, tableros, pulpa de celulosa, papel o energía.

Mencionan que la industria forestal tiene una gran relevancia en países como: Suecia, Finlandia, Chile y Nueva Zelanda. Los problemas de esta área productiva abarcan una gran variedad de aspecto como: la construcción de caminos, la cosecha, el transporte de rollizos y la producción de rollizos aserrables, pulpables y biomasa. Uno de los aspectos más importantes en el ciclo productivo forestal es asegurar que los costos de producción se mantengan bajos y de esta manera continuar siendo competitivos, lo que hace necesario incrementar continuamente la eficiencia de las operaciones.

En este artículo, se presentan varios problemas relacionados a la cadena logística de la empresa Sueca Sodra Cell AB la que produce rollizos pulpables para abastecer varias plantas que los demandan. Este artículo contiene 5 proyectos que se enfocan en optimizar la cadena logística de esta empresa Sueca y en este estudio nos concentraremos en un proyecto para optimizar la cadena de suministro de madera pulpable.

Las plantas de celulosa y papel que consumen rollizos de madera pulpable han comenzado a demandar rollizos de mejor calidad para obtener una calidad más homogénea de su producto final. Hoy en día las plantas tienen definidos criterios de calidad muy amplios en relación a los rollizos pulpables lo que genera que las fibras que entran al proceso sean muy dispares en calidad y el producto obtenido no logre la homogeneidad requerida por los clientes. En esta línea la especie de árbol del cual proviene el rollizo y la frescura, expresada en la cantidad de días que han transcurrido desde que se cortó el árbol, son restricciones de demanda por parte de las plantas de consumo. Lo anterior, hace necesario clasificar los rollizos pulpables de manera separada en el bosque, lo que aumenta los costos de producción y las nuevas restricciones de la industria también podrían aumentar los costos de transporte.

En la planificación de la cadena de suministro de madera la dispersión geográfica de los rollizos pulpables es una variable muy importante en relación a las nuevas restricciones de frescura de los rollizos que necesitan los centros de consumo. Una posibilidad para abordar los nuevos requerimientos es hacer una clasificación por calidad en el bosque, es decir arrumar de manera separa las diferentes calidades de rollizos pulpables. Sin embargo los costos de producción se elevan al tener que realizar clasificación de rollizos en el bosque y en general el margen que se obtiene de la madera pulpable hace imposible aumentar los costos de producción en ciertos bosques.

También los autores establecen, que es importante considerar los flujos de rollizos de todo el sistema, considerando tanto los rollizos pulpables como los rollizos aserrables, de

manera de tener opciones de aprovechar viajes de retorno para transportar rollizos. La figura 2, muestra un típico problema de vieja de retorno. En el aserradero de Heby se cuenta con una demanda de rollizos aserrables y en la planta de pulpa de Hallstavik se dispone de una demanda de rollizos pulpables, existe producción de rollizos de ambos tipos en las zonas de Norra y Vasteras. Una simple solución al problema sería usar flujos directos y enviar los rollizos pulpables de la zona de Vasteras a Hallstavik y enviar los rollizos aserrables de la zona de Norra a Heby. Sin embargo, esta solución es muy ineficiente ya que solo el 50% del tiempo los camiones están viajando cargado. Una solución considerando viaje de retorno es tomar rollizos pulpables en la zona de Vasteras y llevarlos a la planta de celulosa de Hallstavik, para luego viajar a la zona de Norra y tomar rollizos aserrables para llevarlos al aserradero de Heby. Esta solución es más eficiente en el uso de los camiones ya que, están un mayor porcentaje de tiempo viajando cargados.

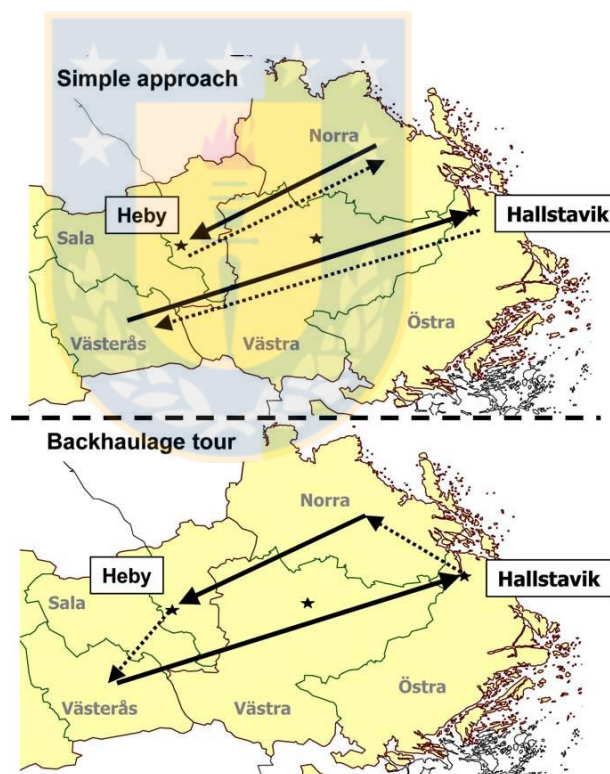


Figura 2: Problema del viaje de retorno.

En el proyecto los autores construyeron un modelo matemático entero mixto para responder al número de ramas de rollizos pulpables a generar en cada bosque, de manera de encontrar la combinación óptima de ramas de rollizos pulpables de todo el sistema. Esto se maneja dando diferentes alternativas de cómo clasificar o arrumar los rollizos pulpables en

cada bosque como una variable de decisión binaria, es decir, solo se escoge una forma de arrumar para cada bosque. Luego es necesario decidir el flujo de madera del sistema considerando o no viajes de retorno cargado para ciertos productos en alguna combinación origen/destino. Normalmente, estos dos problemas son resueltos de manera separada.

El modelo considera variables como la demanda de rollizos según tipo y destino, diferentes alternativas de clasificación de rollizos en cada bosques, costos de clasificación de rollizos en cada bosque y costos de transporte de cada par origen/destino.

En los resultados, el modelo se validó en tres estudios con casos reales. Cada uno de los estudios fue aumentando el tamaño del problema comenzado con 500 restricciones y llegando hasta 3.000, por su parte las variables binarias fueron desde 200 a 1.000 y las variables continuas desde 2.000 a 20.000. El número de potenciales viajes con retorno cargado eran millones. En los 3 casos se encontró la solución óptima al problema planteado.

Las principales conclusiones del estudio establecen que, el modelo desarrollado es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas en relación a como clasificar los rollizos pulpables en bosques y como planificar el flujo de madera en un horizonte de tiempo anual, cumpliendo con las nuevas restricciones de calidad impuesta por los consumidores y controlando los costos de producción y transporte.

3.3 Optimal forest transportation with respect to road investments. [3]

Los autores establecen que la logística del sector forestal es un área con un gran número de aplicaciones en la investigación de operaciones. Este artículo presenta un caso del sector forestal Sueco donde identificaron que el estado de los caminos es un importante problema a la hora de retirar los rollizos desde el bosque y en especial durante la época de primavera donde se producen los deshielos de la nieve acumulada durante el invierno, lo que sumado al constante transporte provoca severos daños a la carpeta de rodado de los caminos generando altos costos de mantención. El artículo presenta un modelo de optimización que busca encontrar la solución óptima para el transporte de rollizos que considera la necesaria inversión que se debe hacer en los caminos para poder tener acceso a la madera durante los periodos de deshielos. Se trata de un modelo de programación entero mixto donde el acceso de los caminos es una variable de decisión binaria. La inversión en la construcción de nuevos caminos y la mantención de los ya existentes no están consideradas en el modelo.

Probaron el modelo con problemas simples y con una heurística se lograron obtener resultados cercanos al óptimo en tiempos razonables.

Los problemas de flujo de redes en el área de las operaciones forestales se han estudiado hace mucho tiempo a través de la creación de modelo de programación lineal. En muchos casos ha sido interesante considerar la relación entre las decisiones de cosecha, logística y plantas de consumo para poder plantear los modelos de programación.

En general, los modelo de programación entera o entera mixta representan los problemas relevantes de las operaciones forestales de mejor manera de lo que lo hacen los modelos lineales o con variables continuas, lo que ha generado que durante el último tiempo los modelos enteros mixtos han desarrollado una creciente atención en el área de la logística forestal.

El Instituto de desarrollo Forestal Sueco intento usar la optimización para encontrar la óptima inversión en caminos para asegurar el retiro de rollizos y simultáneamente cumplir con las demandas. El propósito de este artículo es desarrollar un modelo matemático como apoyo a la toma de decisiones en el problema de decidir en cuales caminos realizar inversiones durante un cierto horizonte de planificación para poder transportar los rollizos. Los montos de inversión para lograr estabilizar caminos forestales que permitan el acceso durante los meses de deshielos en Suecia son muy altos y muchas veces estos caminos también son usados por particulares que tienen sus plantaciones forestales y que no requieren caminos estabilizados ya que no transportan camiones de alto tonelaje o bien detienen sus operaciones durante los meses de deshielos.

Un problema real, de las operaciones forestales puede contener entre 5.000 a 100.000 variables de decisión binarias, lo que hace muy complejo poder encontrar soluciones óptimas en tiempos razonables, haciendo necesario ocupar métodos heurísticos para poder encontrar soluciones cercanas al optimo pero en tiempos de resoluciones razonables.

El modelo escoge que áreas cosechar durante las diferentes temporadas del año. Esta selección afecta el costo de inversión en caminos y el costo de transporte de rollizos de madera durante el periodo de deshielos.

El problema y los supuestos establecidos por los autores son, que las rutas de ripio que no tienen dificultades durante la temporada invernal se vuelven inaccesibles durante el periodo de primavera cuando la nieve y el hielo acumulados durante el invierno se derriten aportando mucha agua al terreno lo que reblandece el terreno haciendo que no pueda soportar el transporte de camiones.



Figura 3: Rutas inaccesibles durante la primavera.

(Optimal forest transportation with respect to road investments. [31])

Sin embargo las plantas que consumen los rollizos requieren un abastecimiento constante y aplanado de rollizos para su proceso productivo por lo cual es imposible pensar en detener el despacho de rollizos durante la época de deshielos en Suecia. Existen diferentes maneras de asegurar que las plantas tenga un flujo constante y aplanado durante la época de primavera.

- Tener un alto stock de seguridad de rollizos disponible en las plantas para que las variaciones de abastecimiento durante la primavera no detenga en proceso productivo de la planta.
- Mover un volumen de rollizos durante el invierno a caminos que tengan acceso durante todo el año, generando un alto stock de rollizos con posibilidad de despacho durante el periodo de deshielos.
- Hacer inversiones en los caminos que lo requieran de manera que estén con acceso durante los periodos de deshielos.

Probablemente la estrategia óptima es una combinación de las tres opciones mencionadas y debido a que el problema sería demasiado complejo en este artículo solo se

considera la opción de realizar o no inversiones en los caminos de manera de asegurar su accesibilidad todo el año.

La clasificación de los caminos fue hecha de acuerdo al sistema de clasificación de caminos usado en por el sector forestal Sueco en cual considera:

- Caminos con acceso durante todo el año fueron identificados como los camino tipo A.
- Caminos con acceso durante todo el año excepto en los periodos de deshielos durante la primavera fueron identificados como los caminos tipo B.
- Caminos con acceso durante la temporada de verano e invierno fueron identificados como los caminos tipo C.
- Caminos con acceso solamente durante la temporada de invierno fueron identificados como los caminos tipo D.

En este artículo se realiza la comparación de realizar la inversión en caminos para poder realizar el despacho de rollizos durante la temporada de primavera contra el costo de almacenamiento de rollizos y contra el costo de comprar rollizos, todas opciones viables para lograr mantener el normal abastecimiento de rollizos a las plantas industriales.

El modelo considera los siguientes supuestos:

- No existe la mantención de los caminos que se decide estabilizar ya que es muy complejo poder determinar que caminos que se decida estabilizar presentaran deformaciones durante la época de deshielos, las cuales, si se corrigen oportunamente no generan un elevado costo y no generan inconvenientes para el transporte.
- La distancia entre las canchas de acopio de áridos y los caminos a estabilizar se asume constante para todos los periodos, lo que en situaciones normales es verdadero y podría no ser así solo por un error en la planificación del volumen necesario de áridos requeridos para estabilizar un camino.
- Los rollizos de madera no están separados en diferentes calidades de rollizos ya que no se tenía información al respecto, además de que si se consideraban las diferentes calidades de rollizos el tamaño y complejidad del problema aumentaba dramáticamente.
- El flujo de rollizos se asume solo en un sentido por cada camino.
- No existe límite de cosecha anual, por lo tanto todo un área durante un año.

- El periodo de deshielos se concentra durante el temporada de primavera por lo que las rutas en las que se decida invertir en estabilizado solo pueden ser usadas en el periodo de primavera y el resto de los caminos deben usarse durante el resto del año.
- El costo de los áridos necesarios para estabilizar un camino se calculan con una función lineal que considera la distancia entre la cancha de acopio de áridos hasta el camino a ser estabilizado.

Los autores consideran, un modelo matemático entero mixto que buscar minimizar el costo total de transporte de rollizos e inversión en caminos en un horizonte de diez años divididos en periodos temporada/año, considerando como temporadas el verano, invierno y primavera.

Las variables de decisión del modelo, son el volumen de rollizos a transportar desde un bosque determinado a una planta de consumo, variable continua, y una variable entera binaria que decide si un determina par bosque/planta será estabilizado para que pueda tener acceso durante el periodo de deshielos en primavera.

Existen una serie de restricciones pero la más dura es la necesidad de cosechar un determinado volumen de madera durante cada periodo para poder abastecer las plantas industriales.

Debido a que la duración del periodo de deshielos en el norte de Suecia es bastante irregular y difícil de pronosticar el modelo se corrió bajo tres escenarios diferentes los cuales consideraban periodos de deshielos de 3,6 y 9 semanas de duración, periodos en los cuales existe una demanda de 1.000, 2.000 y 3.000 metros cúbicos de madera sin corteza respectivamente.

Para resolver los autores, usaron el software LINGO 6.0 y se probó en las 3 instancias todas en un horizonte de 10 años pero con diferentes demandas anuales de rollizos durante el periodo de deshielos.

El primer escenario que plantea una duración del periodo de deshielos de 3 semanas y la correspondiente demanda de 1.000 metros cúbicos de rollizos corrió sin problemas y el software encontró la solución óptima en un par de segundo, sin la necesidad de recurrir a métodos heurísticos.

El segundo escenario que plantea una duración del periodo de deshielos de 6 semanas y la correspondiente demanda de 2.000 metros cúbicos de rollizos no pudo ser resuelto de

manera óptima por LINGO 6.0. Para poder obtener una solución factible y cercana al óptimo fue necesario usar métodos heurísticos. Para encontrar una solución se obtuvo primero una solución factible con LINGO 6.0 la cual se consideró como el límite superior y se usó LINGO 6.0 para encontrar una solución con menor valor en la función objetivo y se definió como criterio de término 10 horas de iteraciones. La mejor solución se obtuvo luego de 3 iteraciones.

Para el tercer y último escenario que plantea una duración del periodo de deshielos de 9 semanas y la correspondiente demanda de 3.000 metros cúbicos de rollizos también fue necesario utilizar el método heurístico y la mejor solución se encontró luego de 4 iteraciones.

Después de alcanzar los resultados, en el artículo se establece que el tamaño del problema planteado en el tercer escenario, solo representa el 10% del tamaño de un problema real en la zona norte de Suecia. El modelo del escenario 3 tenía 2.870 variables de decisión y 2.402 restricciones. 780 variables eran binarias y las restantes eran variables continuas. La gran cantidad de variables binarias hacen imposible poder encontrar la solución óptima en tiempos razonables utilizando el software LINGO 6.0, lo que hace necesario recurrir a métodos heurísticos para poder encontrar soluciones cercanas al óptimo en tiempos razonables.

3.4 Supply chain modelling of forest fuel. [4]

Los autores mencionan que, durante los últimos años ha aumentado la demanda por bio combustibles para generar energía. En Suecia, la demanda de energía eléctrica se ha incrementado en un 18% desde el año 1990. Como respuesta al aumento de los impuestos y las regulaciones medio ambientales a la contaminación del medio ambiente con CO₂ la bio energía a tenia un rápido crecimiento. La bio energía es generada en plantas pequeñas que están cerca de ciudades o poblados y que proveen de energía eléctrica a la comunidad. La cantidad de estas plantas ha mostrado un sostenido crecimiento durante los últimos años.

Los combustibles usados para generar bio energía provienen normalmente de cosechas forestales de pequeñas comunidades locales que explotaron sus bosques para proveer energía a las ciudades. El incremento en la demanda de combustibles bio energéticos ha comenzado a desarrollar una serie de herramientas para el apoyo a la toma de decisiones en relación al complejo sistema de planificación y abastecimiento de combustibles bio energéticos que requieren las plantas que consumen estos productos.

Existe una variedad de combustibles bio energéticos. Una de los tipos de bio combustibles más comunes es la madera la cual puede ser dividida en desechos forestales o en desechos reciclados de madera, como los desechos de los aserraderos o plantas de tableros. Otros tipos de bio combustibles se pueden obtener de la caña de azúcar, de la paja o de los desechos del papel. El suministro de combustibles bio energético proveniente de desechos forestales debe ser proporcionado para que las plantas bio energéticas puedan operar ya que están obligadas por contrato a generar una cantidad mensual de energía, especificada en mega watts, la cual puede sufrir variaciones de más o menos 10 a 15% para absorber variaciones en la demanda energética producto de cambios inesperados en el clima local y la consiguiente alza o baja en el consumo de energía para calefaccionarse.

Las plantas que producen bio energía pueden usar una variedad de combustibles bio energéticos pero en este artículo se centra solo en los bio combustibles forestales y en el problema de decidir cuándo y cuales residuos forestales deben ser convertidos en bio combustibles y como estos residuos deben ser transportados y almacenados en orden a satisfacer la demanda de combustible que generan las plantas generadoras de bio energía. La decisión incluye la posibilidad de cosechar o no áreas adicionales y que aserraderos deben ser contratados para proveer desechos forestales. Adicionalmente la decisión considera el flujo de los productos desde los aserraderos o los puertos en caso de usar barcos para su transporte y también la decisión de que terminales usar. El horizonte de planificación es anual y subdividido en periodos mensuales. El problema es planteado a través de un modelo de programación matemática entero mixto y se plantean diferentes métodos de resolución. El artículo plantea un modelo de optimización para el problema de suministrar bio combustibles a las plantas de bio energía al mínimo costo posible para cumplir con el contrato de generación de bio energía.

Las mayores fuentes generadoras de bio combustibles son las cosechas forestales, en donde los residuos de la cosecha pueden ser convertidos en pequeñas astillas que luego son usadas como bio combustibles o los desechos de los aserraderos como corteza de los rollizos procesados o bien el aserrín que se genera del proceso de corte de los rollizos. Los bio combustibles pueden ser transportados directamente a la planta de bio energía o bien transportados hasta una bodega de almacenamiento para ser consumidos posteriormente. También existe la posibilidad de importar diferentes tipos de desechos forestales, principalmente en barcos provenientes de Rusia o de los estados Bálticos.

Las bodegas de almacenamiento, también llamadas terminales, son necesarias para balancear las fluctuaciones estacionales en el consumo de bio combustibles, en donde se pueden almacenar bio combustibles en forma de astillas o en forma de desechos provenientes de aserraderos.

El problema planteado en este artículo, es un verdadero problema de cadena logística o cadena de suministros ya que existen varias fuentes productoras (áreas cosechadas, aserraderos o importación en barco) varios terminales intermedios o bodegas intermedias para almacenar, varias plantas que demandan los productos, varios tipos de bio combustibles y múltiples periodos. El problema presentado contiene decisiones en relación a qué tipo de bio combustible utilizar, el momento de transformarlo los desechos en astillas, la ubicación de los astilladores y de los centros para almacenar y el diseño del patrón de transporte. Las decisiones principales son si cosechar o no un área específica o establecer un contrato con un determinado aserradero para el abastecimiento de desechos en forma de bio energía y si un determinado centro de acopio debe ser utilizado. Adicionalmente existen restricciones de capacidad para el astillado, el maderado de desechos a orilla de camino y la capacidad de almacenamiento.

El modelo planteado en este artículo puede ser utilizado principalmente para evaluar y dar respuesta a las siguientes situaciones:

- La compañía está compitiendo por un nuevo contrato de abastecimiento de bio combustible y necesita postular con precios competitivos pero que a su vez le permitan continuar en el negocio.
- La compañía está realizando un análisis de sensibilidad en relación a las variaciones en el abastecimiento de bio combustibles que plantea un nuevo contrato y necesita conocer sus impactos.
- Un nuevo punto de acopio está disponible o se modificó la capacidad de almacenamiento de un punto de acopio existente y se requiere conocer el impacto.
- La capacidad de astillado o de transporte se modificó y se necesita conocer su impacto.
- La tecnología de astillado está cambiando, por consiguiente el costo de astillado está cambiando y se necesita conocer su impacto sobre la compañía.
- La compañía está negociando un contrato con un puerto para importar bio combustible y necesita conocer los precios que podría pagar por el uso del puerto y sus impactos.

El problema tratado considera los siguientes elementos o componentes.

- **Suministro de bio combustible forestal:** Las plantas que demandan combustibles bio energéticos forestales pueden obtenerlo desde diversas fuentes entre las que se cuentan las cosechas forestales, los desechos de aserraderos y mediante la importación.

Las cosechas forestales pueden ser divididas en dos tipos. Las áreas de cosechas que son explotadas por la misma empresa dueña de la planta bio energética y las áreas de cosecha que son explotadas por terceras empresas. En el caso de obtener el combustible desde las cosechas realizadas por la misma empresa dueña de la planta bio energética, el combustible puede ser estimado en la etapa de planificación de la cosecha y de esta manera conocer anticipadamente la disponibilidad del combustible, por el contrario para ingresar a extraer combustible de los desechos de cosecha forestal realizada por terceras empresas se debe realizar un contrato con una tercera empresa que fija un precio para abastecer de bio combustible a la planta desde un determinado bosque. La pregunta para la empresa es si firmar el contrato de abastecimiento a un determinado precio o no.

Luego de realizar la cosechar, los desechos forestales deben ser acopiados y madereados o transportados por vehículos especiales hasta la orilla de los caminos donde pueden o no ser astillados para su posterior transporte. La pregunta es cuándo realizar el proceso de acopiado y madereo, para lo que hay que tener en cuenta el periodo de cosecha del bosque ya que a medida que pasa el tiempo los desechos pierden humedad, especialmente en verano.

Para el caso de los aserraderos existen tres combustibles bio energéticos, la corteza, el aserrín y las astillas secas, la producción de cada aserradero puede ser estimada y es bastante regular. En general los combustibles bio energéticos provenientes de los desechos del proceso de aserrío deben ser transportados a las plantas de consumo de manera casi inmediata ya que no existe espacio en los aserraderos para almacenarlos, por lo tanto la pregunta es si transportarlos directos a la planta o a un centro de acopio intermedio.

En el caso de poder importar cualquier de los combustibles bio energéticos antes mencionados es necesario definir el precio final del producto y el lugar de entrega que puede ser la planta bio energética, un punto de acopio intermedio o bien un punto de acopio en el mismo puerto donde llegara el barco.

- **Terminales:** Los terminales o puntos de acopio intermedios son puntos de almacenamiento intermedio que permiten balancear variaciones estacionales en la oferta y la demanda de combustibles bio energéticos. En los terminales pueden almacenarse tanto astillas combustibles usadas como bio combustibles provenientes de desechos forestales o bien desechos de cosechas forestales que aún no hayan sido convertidos en astillas combustibles. Cada terminal tiene una capacidad y costos conocidos de almacenamiento para cada tipo de producto.
- **Plantas bio energéticas:** Las plantas productoras de bio energía tienen una fuerte fluctuación en relación a su demanda ya que en Suecia está muy relacionada a la estación del año. Durante el invierno la demanda puede llegar a ser un 800% mayor que durante los meses de verano, como lo muestra el siguiente gráfico.

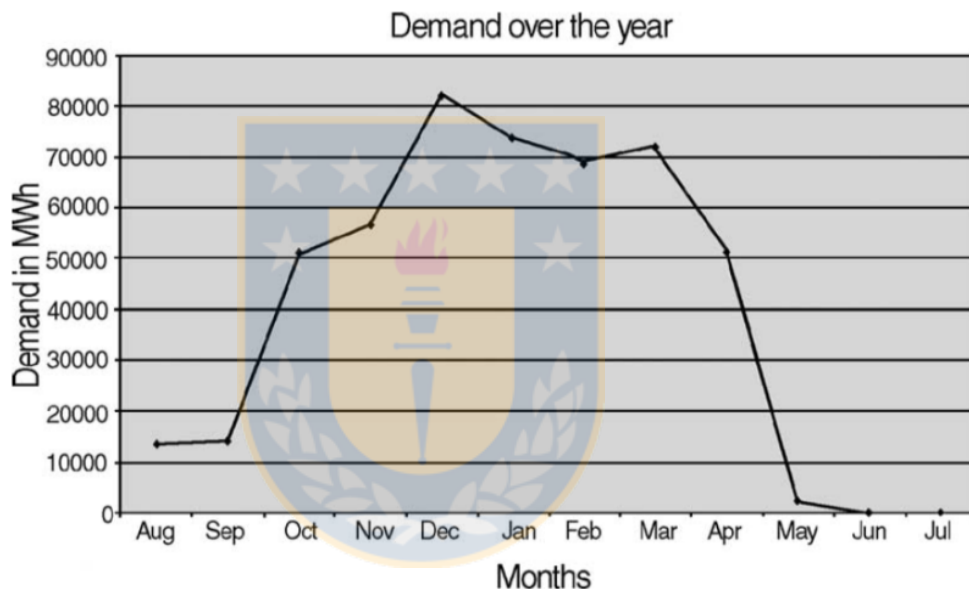


Figura 4: Demanda de bio energía en Suecia.

(Supply chain modelling of forest fuel. [4])

También es importante considerar que las plantas productores de bio energía solo pueden consumir una proporción de corteza y aserrín como combustibles ya que un combustible con exceso de estos productos podría dañar sus calderas.

- **Transporte:** El transporte de los desechos forestales que serán usados como bio combustibles es realizado en diferentes tipos de camiones dependiendo del producto. La pregunta clave a responder es si los productos deben transportarse a un terminal o a un destino final. Los costos de transporte varían en directa relación con la distancia y el tipo de producto

a transportar. Adicionalmente se debe considerar que existe una capacidad limitada de transporte para cada periodo y producto.

Para resolver, los autores construyeron un modelo de programación entero mixto y se definieron los siguientes grupos de variables de decisión:

VARIABLES DE DECISIÓN QUE REPRESENTAN EL ABASTECIMIENTO O SUMINISTRO DE RESIDUOS FORESTALES EN FORMA DE BIO COMBUSTIBLES EN CADA PERIODO, EN DONDE SE DEFINIERON:

1. El volumen del producto “p” a ser madereado en el bosque “i” durante el periodo “t”.
2. El volumen del producto “p” a ser convertido en astillas en el bosque “i” durante el periodo “t”.

VARIABLES DE DECISIÓN QUE REPRESENTAN EL FLUJO DE TRANSPORTE DE LOS PRODUCTOS EN CADA PERIODO, EN DONDE SE DEFINIERON:

1. Volumen del producto “p” no convertido en astillas desde el fundo “i” al centro de acopio intermedio “j” durante el periodo “t”.
2. Volumen del producto “p” convertido en astillas desde el fundo “i” al centro de acopio intermedio “j” durante el periodo “t”.
3. Volumen del producto “p” convertido en astillas desde el fundo “i” a la planta de consumo “k” durante el periodo “t”.
4. Volumen del producto “p” convertido en astillas desde el centro de acopio intermedio “j” a la planta de consumo “k” durante el periodo “t”.

VARIABLES DE DECISIÓN QUE REPRESENTAN LA POSIBILIDAD DE ALMACENAR LOS DIFERENTES TIPOS DE COMBUSTIBLES BIO ENERGÉTICOS.

1. Volumen del producto “p” no convertido en astillas que es almacenado en el bosque “i” al final del periodo “t”.
2. Volumen del producto “p” no convertido en astillas que es almacenado en el centro de acopio intermedio “j” al final del periodo “t”.
3. Volumen del producto “p” convertido en astillas que es almacenado en el centro de acopio intermedio “j” al final del periodo “t”.

También fue necesario definir una variable de decisión en relación al volumen del producto “p” que debe ser convertido en astillas en el terminal “j” durante el periodo “t”.

De la misma manera se crearon 3 variables de decisión binaria.

1. Si el residuo forestal del bosque “i” debe ser madereado durante el periodo “t”.
2. Si el residuo forestal del bosque “i” debe ser convertido en astillas durante el periodo “t”.
3. Si el aserradero “ISc” debe ser contratado para proveer bio combustibles.
4. Si el centro de acopio intermedio “j” debe ser usado.

En relación a las restricciones del modelo, se crearon 18 grupos de restricciones que modelan el problema en donde se encuentran restricciones en relación a capacidades de almacenamiento de los centros de acopio intermedios, secuenciación del flujo de los productos como es la necesidad de que todo lo que se decide convertir en astillas debe ser transportado durante el mismo periodo a la planta de consumo y por supuesto restricciones que aseguren el abastecimiento de bio combustibles a la planta. La demanda de la planta se expresa en términos de energía que requiere ser abastecida (mega watts hora) pero sin embargo todos los productos transportados a la planta se expresan en volumen por lo que fue necesario utilizar un factor de conversión de volumen a energía.

La función objetivo busca minimizar el costo total de abastecimiento de combustible demandado por la planta.

El costo total está compuesto por:

- El costo de transporte: Dado por la distancia entre cada par origen/destino y el tipo de producto a transportar.
- El costo de conversión en astillas: Dado por el costo de transformar los desechos de la cosecha forestal en astillas combustibles.
- El costo de almacenaje: Dado por el costo financiero que significaría guardar desechos forestales o astillas combustibles.
- El costo de los terminales: Dado por el costo que significaría operar un determinado terminal para almacenar desechos forestales o astillas combustibles.
- Costo de compra: Dado por el costo que significaría comprar combustibles bio energéticos en aserraderos o bien importarlos.

El modelo se probó en varias instancia siendo la de mayor tamaño con 7 plantas de consumo, cada una con una demanda diferente, 426 áreas de cosecha, 3 aserraderos, 4 terminales y 12 periodos y se generaron 505.112 variables, 10.201 variables binarias y 63.122 restricciones.

Los resultados del artículo muestran que el modelo propuesto, para la cadena de suministro de las plantas bio energéticas puede entregar soluciones usando datos de problemas reales en tiempos computacionales razonables. El modelo se probó con datos de una planta ubicada en el norte de Suecia, y el siguiente cuadro resume el tamaño del problema.

Tabla 1: Resumen del tamaño del problema. (Supply chain modelling of forest fuel. [4])

Cantidad de bosques	426
Cantidad de aserraderos	3
Cantidad de centros de acopio intermedios	4
Cantidad de plantas bio energeticas	7
Cantidad de periodos	12
Cantidad total de variables	505.112
Cantidad de variables binarias	10.201
Cantidad de restricciones	63.122

Se probaron 2 métodos de resolución. El primero fue usando el software CPLEX 6.5 y el segundo método fue encontrar una solución cercana al óptimo a través de una heurística.

Se generaron 6 escenarios o instancias para comprobar el buen funcionamiento del modelo y los métodos de resolución.

Problema 1: *El problema base.*

Problema 2: *Restricciones en los niveles de almacenamiento.* Un almacenamiento mínimo de 10.000 metros cúbicos en cada centro de acopio intermedio es definido como una nueva restricción con respecto al problema base, esto para representar la necesidad de tener permanentemente un stock de seguridad disponible de bio combustibles.

Problema 3: *Incremento de la demanda.* La demanda de todas las plantas se aumentan en 10% respecto al problema base durante algún periodo, esto para representar una situación de extremas bajas temperaturas que hagan aumentar la demanda de energía y por ende la demanda de bio combustibles.

Problema 4: *Mayor número de consumidores.* Una nueva planta productora de bio energía con una demanda de 100.000 mega watts hora es incluida en modelo. Esta instancia es muy relevante para conocer el impacto sobre los costos de suministro de bio combustibles y como sufre modificaciones en la oferta de bio combustibles.

Problema 5: *Cambios en la capacidad de astillado.* La capacidad de astillado decrece en cada periodo siguiente, esto para representar una situación en la cual las empresas de astillado se encuentran en un periodo de negociación de tarifas.

Problema 6: *Nuevos centros de acopio intermedios.* Un nuevo centro de acopio intermedio cercano a una planta de consumo de combustibles bio energético es introducida al modelo.

Cada una de las 6 instancias fueron resueltas de manera lineal y entera usando CPLEX 6,5 y también se resolvieron usando una heurística. El método de resolución lineal encontró el solución óptima entre 0,11 y 0,18 horas. El método de resolución entero fijo como termino del proceso iterativo un tiempo máximo de 6,6 horas. Las instancias 1,2,5 y 6 encontraron soluciones con un GAP menor a 1% en menos de 6,6 horas mientras que las instancias 3 y 4 alcanzaron las 6,6 horas y se detuvieron. Por su parte la heurística encuentra mejores soluciones que CPLEX 6,5 para las instancias 2,3 y 6 y en la mitad de tiempo que CPLEX 6,5 y soluciones levemente peores para las instancias 1,4 y 5.

Los autores concluyen que el modelo construido para la cadena de suministro de combustibles bio energéticos, puede ser usado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones de la compleja cadena de suministro de las planta bio energéticas. El modelo puede ser resuelto en tiempos computacionales aceptables entregando soluciones muy cercanas al óptimo.

El modelo permite encontrar mejores soluciones y evaluar diferentes escenarios en un menor tiempo en comparación con realizar planificaciones manuales de la cadena de suministros.

En conclusión, los autores creen que el modelo presentado y los métodos de solución propuestos pueden ser usados como una importante herramienta para la toma de decisiones tácticas y estratégicas en el área de planificación de cualquier empresa del área industrial relacionada.

3.5 A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain – A case study in the Chilean forest industry. [5]

Para los autores de este artículo, la cadena de valor en la industria forestal comienza con las operaciones de cosecha donde se producen muchos tipos diferentes de rollizos, por ejemplo, rollizos aserrables, rollizos pulpables o rollizos combustibles. Los diferentes tipos de rollizos son definidos según atributos como especie, edad, largo y diámetro. Cada tipo de rollizo tiene un destino diferente y se pueden utilizar para fabricar madera sólida, tableros, celulosa o energía y en algunos casos los productos secundarios son nuevamente transportados hasta una segunda fábrica para ser transformado en el producto final. Es importante hacer notar que la cadena de valor de la industria forestal es divergente, es decir que las decisiones que se toman producen una serie de efectos en los procesos posteriores, por lo que la planificación y coordinación entre los diferentes procesos es de vital importancia.

En este artículo se comparan dos estrategias diferentes para realizar la planificación de la cadena de valor de la industria forestal. En la primera estrategia la planificación del área forestal esta desacoplada de la planificación de la industria, la cual se realiza posterior a la planificación forestal, la cual busca maximizar el valor presente de la madera y posteriormente se realiza la planificación de la industria que busca maximizar el margen de ganancias según los rollizos entregados desde el bosque. Por el contrario, comparemos la estrategia desacoplada con una segunda estrategia en donde el bosque y las plantas industriales se acoplan en busca de generar el producto que genere el máximo beneficio integrado a la compañía.

La principal diferencia entre ambas estrategias es el hecho de cómo usar la información de demanda de productos para realizar la planificación de la cadena de valor. La literatura presenta una serie de modelos de optimización acerca de problemas relacionados en que silvicultura aplicar a un determinado bosque, que rodales cosechar durante un determinado año o cual es la edad optima de rotación. Sin embargo algunos de estos modelos solo responden a decisiones de corto plazo pero si las decisiones en relación al bosque y la industria no están acopladas solo se lograra encontrar soluciones sub óptimas. Las plantas industriales no logran maximizar sus beneficios debido a que constantemente deben ajustar sus procesos a los trozos que les son enviados desde el bosque los que tampoco logran maximizar el valor de la madera si no toman en cuenta los requerimientos del mercado de productos terminados.

El estudio de la cadena de valor del artículo considera la estructura de la cadena logística de las 2 mayores empresas forestales Chilenas que operan con 3 secciones bien delimitadas en la cadena de valor. Primero está el área forestal que es la responsable de suministrar rollizos de madera a las plantas industriales, las que constituyen la segunda sección de la cadena logística. La tercera parte está compuesta por las plantas industriales secundarias, los centros de distribución y los consumidores finales. Estas empresas están integradas verticalmente y cada unidad de negocios es manejada de manera independiente. La coordinación interna es vital pero cada negocio tiene foco en optimizar sus propios objetivos.

El área forestal por su parte tiene como objetivo maximizar el valor presente neto del bosque y el horizonte de planificación debe considerar al menos una rotación completa y la decisión central es que áreas cosechar y cuales postergar. Por su parte las plantas industriales trabajan con horizontes de planificación anuales.

En este artículo se comparan dos estrategias diferentes para la cadena logística forestal e industrial. La primera, llamada estrategia desacoplada, considera que primero el área forestal determina la cosecha óptima y por defecto la producción de rollizos de madera y luego de manera posterior y con la asignación de rollizos entregada por parte del área forestal las plantas industriales planifican su producción con el objetivo de maximizar su valor presente neto. La segunda estrategia, llamada estrategia acoplada, considera que la demanda está dada para cada producto final que fabrican las plantas industriales lo que genera que la planificación tanto del bosque como de las plantas industriales trabajen coordinadamente para la cadena logística integral o completa maximizando el valor presente neto de todo el negocio.

Para evaluar las dos estrategias se construyó un modelo matemático entero mixto el que describe la planificación integrada del bosque y la industria. Para obtener los resultados de la primera estrategia el modelo se subdivide en dos partes, determinado primero la cosecha forestal óptima y usando esta información para planificar la producción de las plantas industriales. Para conocer los resultados de la segunda estrategia el modelo se corre integrado con demanda por los productos finales que fabrican las plantas industriales.

El modelo planteado considera que la función objetivo del modelo matemático busca maximizar el valor presente neto del bosque para lo cual se debe decidir qué áreas de bosque deben ser cosechadas en un horizonte de 5 años, considerando la demanda por los diferentes tipos de rollizos en cada planta industrial, los costos de transporte entre cada área a cosecha y su destino. Cada área de bosque tiene una edad mínima para ser cortada, la cual está definida

según el manejo que haya recibido durante su crecimiento y también se modela el crecimiento anual que tiene cada área de bosque que no se decida cosechar. También se modela un conjunto de restricciones que fijan un mínimo y un máximo de cosecha anual de manera de asegurar la sustentabilidad permanente del bosque.

El modelo considera 9 variables de decisión entre las que se encuentran:

- Una variable binaria que decide si una determinada área de bosque debe ser cosechada en un determinado periodo.
- Flujo de madera de una determinada área en cosecha, a una determinada planta industrial, de un determinado tipo de trozo en un periodo.
- Producción de un determinado tipo de producto final en una planta industrial durante un periodo.

Para probar el modelo matemático los autores consideraron un caso de estudio de una empresa forestal Chilena. Para el estudio se consideró el siguiente escenario:

- 1.226 áreas de cosecha.
- 7 tipos de rollizos.
- 3 aserraderos, 1 planta de celulosa y 1 planta de energía térmica.
- 5 productos finales.

Se consideró un horizonte de planificación de 25 años en donde los primeros 5 años los periodos son anuales y los restantes 20 años se consideraron 4 periodos con una duración de 5 años cada uno.

El modelo matemático fue construido en lenguaje AMPL y resuelto con el software CPLEX. Se construyeron 4 escenarios base para cada uno de los 4 grupos de instancias que se modelaron. El primer grupo de instancias considero cambios en las tasas de interés, el segundo grupo diferencias en los precios de los productos finales y diferencias en la demanda de rollizos, el tercer grupo de instancia considero cambios en los precios de los rollizos pulpables y por último el cuarto grupo considero diferencias en los crecimientos de los bosques.

Para todos los escenarios modelados la estrategia acoplada, que considera las demandas en relación a los productos finales generados por cada planta industrial, siempre obtiene mayores beneficios o mayor valor en la función objetivo en una banda entre 1,53% y 5,21% con respecto a los escenarios que consideraron la estrategia desacoplada. La principal

razón para explicar esta variación constante en el valor de la función objetivo es que la estrategia acoplada puede determinar que productos finales son con los que se obtienen mayores beneficios y de esta manera determinar cómo producirlos al menor costo posible y obtener el máximo beneficio posible. El modelo integrado puede decidir de mejor manera en que momento cosechar una determinada superficie de manera de producir cierto tipo de rollizos dependiendo del valor del producto final que se puede fabricar con dichos rollizos.

También se concluye que los mayores beneficios se obtienen sin generar presión sobre la corta sustentable del bosque ya que utilizando la estrategia acoplada se logra obtener mayores beneficios con una tasa de cosecha decreciente lo que no se logra con la estrategia desacoplada. Estas tasas de cosecha generan un impacto positivo en el valor de las acciones y el flujo de caja de la compañía.

Si bien el caso de estudio utilizado para probar el modelo es relativamente simple son claros los beneficios de utilizar la estrategia acoplada por sobre la estrategia desacoplada y mientras más detallada sea la información en cuanto a tipos de rollizos y tipos de productos finales mejor será la decisión de que áreas cosechar en que momento de manera de producir el nivel correcto de cada tipo de rollizo y obtener los mayores beneficios.

3.6 Forestry optimization.[6]

En este artículo, se establece que la industria forestal es muy importante en una serie de países entre los que se cuenta Chile, Canadá, Suecia, Finlandia y Nueva Zelanda. El bosque provee productos como papel, madera, productos para la construcción y mueblería y al mismo tiempo provee una serie de servicios como recreación, preservación de la vida salvaje y vegetación. Los problemas de planificación del área forestal cubren diferentes aspectos o actividades como la plantación, construcción de caminos, cosecha, transporte y producción de materia prima para plantas industriales de aserrío, celulosa, paneles y producción de bioenergía en forma de calor.

Los modelos de optimización en el área forestal se han utilizado para resolver problemas de planificación durante los últimos 30 años y cada vez se han vuelto más complejos debido al aumento de las restricciones, especialmente las relacionadas al medio ambiente durante los últimos años y aún quedan muchas áreas que requieren desarrollar nuevos modelos que permitan encontrar soluciones a una serie de problemas.

Existen bastantes diferencias entre las realidades de cada país entre las que destacan las mayores o menores capacidades que tiene las diferentes empresas en cada país en relación

a la capacidad de planificar y controlar el flujo de madera que en gran medida está fuertemente relacionado con las leyes que regulan la capacidad de cosecha en cada país lo que a su vez determina la eficiencia que pueda lograr cada empresa. Otro aspecto en el cual se encuentran grandes diferencias es la tasa de crecimiento del bosque que a su vez se traduce en los años necesarios para que el bosque este maduro para ser cosechado, lo que varía entre 25 y 200 años o en algunos casos aún más. La capacidad de exportación también es un área con marcadas diferencias entre los países forestales pero hoy en día y en términos generales, el foco en las necesidades de los cliente han generado que nuevas tecnologías permitan hacer un mayor aprovechamiento de la materia prima y la logística de la cadena de suministros para llegar con el producto correcto en el momento oportuno a cada cliente se vuelve cada día mas compleja.

El objetivo de este artículo es poder realizar una revisión general del estado del arte en relación al flujo de madera del área forestal y presentar algunos problemas y métodos de solución.

En este artículo el flujo de madera comienza con la cosecha en donde los árboles son derribados y posteriormente se cortan las ramas para luego trozar diferentes productos que se diferencian según diámetro, largo y calidad. Luego las pilas de trozos son transportadas hasta una zona abierta del bosque para luego ser cargadas en camiones y transportadas hasta los clientes. En algunos casos, los arboles no son trozados en el bosque y son transportados completos hasta un centro industrial, lugar en donde se puede realizar el trozado con tecnología que permite un mejor aprovechamiento de cada árbol. En general la cosecha no es balanceada durante todo el año, por ejemplo en los países Nórdicos la cosecha es transportada durante el invierno para no dañar el suelo. En general, durante los meses de intensas lluvias o de deshielos es muy complejo poder transportar madera desde el bosque a los centros industriales por el mal estado de los caminos y para lograr continuar abasteciendo de rollizos a las plantas es necesario transportar rollizos desde centros de acopio previamente definidos y con rollizos disponibles productos del abastecimiento de estos durante las épocas en las cuales el bosque tiene acceso.

Existen una serie de actores en el flujo de madera pero básicamente se pueden agrupar en 4. Las grandes industrias forestales con centros industriales propios que pueden ser tanto privadas como públicas, asociaciones forestales que agrupan una seria de mediados y pequeños dueños de bosques, aserraderos independientes que no posee superficie de bosques y los pequeños dueños de bosques privados que no tiene conexión con otros pequeños

propietarios. Además de todos estos actores primarios que representan a los productos y consumidores de rollizos existen una serie de actores secundarios como las empresas de cosecha y transporte de rollizos y productos finales que pueden ser centralizadas o bien descentralizadas, sin embargo todos los actores reconocen la necesidad de coordinación entre todos, de manera de hacer más eficiente el flujo de madera.

Hoy en día existen una gran cantidad de modelos de optimización para los diferentes problemas relacionados al flujo de madera. En general los diferentes modelos se aplican según el nivel de planificación en el que se encuentra cada problema reconociendo problemas de nivel estratégico, táctico u operativo. De la misma manera existe una serie de diferentes métodos de resolución los que tienen diferentes tiempos para encontrar soluciones buenas u óptimas, en el caso de problemas de nivel operativo los tiempos de respuesta pueden ser de segundos o minutos mientras que para problemas de nivel estratégico pueden necesitarse horas para poder encontrar soluciones factibles.

Las decisiones estratégicas que incluyen en el artículo, son de tipo espaciales y temporales. Básicamente que zonas de bosques cosechar y cuando hacerlo. Debido al gran tamaño del problema casi siempre se toman decisiones con información agregada y se busca mantener la sustentabilidad del bosque con volumen de cosecha constantes y obtener el mayor valor presente neto de la masa forestal. Los modelos consideran las demandas de los clientes y restricciones ambientales y de cosecha. En general se trata de modelos lineales que consideran horizontes de planificación del orden de 2 décadas.

Otro grupo de modelos consideran horizontes de planificación de menos de 20 años los cuales consideran decisiones en relación a que caminos construir o mejorar. En general se trata de modelo enteros que utilizan variables binarias como variables de decisión. El uso de restricciones de adyacencia, en las áreas de cosecha, es común para representar restricciones ambientales de no poder cosechar una determina superficie total durante un año o durante una serie continua de años.

Los planes tácticos consideran, cosecha mensual para un horizonte anual incluyen decisiones como que áreas cosechar cada mes, que equipos utilizar para la cosechar además de donde y cuando transportar cada tipo de rollizo. En general se trata de modelos matemáticos enteros mixtos. Este tipo de modelos pueden ser modificados de manera rápida en relación a la cantidad de tipos de rollizos, lugar y capacidad de centros de acopio, ventanas

de tiempos o decisiones en relación a obligar u evaluar la cosecha de una determinada área en un periodo de tiempo específico.

Los problemas operativos en el artículo, se concentran principalmente en como trozar cada uno de los árboles de manera de asegurar obtener el mejor aprovechamiento económico. Los modelos en relación a la problemática del trozado se han desarrollado principalmente con programación dinámica. En algunos países la decisión de trozado aún se toma de manera manual y basada en la experiencia del trozador, es por eso que se han desarrollado algunos modelos para tomar decisiones más robustas y con mayor evaluación. Estos modelos básicamente tienen restricciones en relación al diámetro, largo y calidad de los rollizos lo que genera modelos bastante complejo ya que en general un modelo que contiene 20 productos diferentes con árboles de 30 metros de largo puede generar entre 6.000 y 60.000 variables de decisión.

La industria forestal requiere de un continuo despacho de madera durante todo el año. Las decisiones relacionadas con el transporte se van tomando en relación al nivel de planificación en el cual se encuentra el modelo. A nivel estratégico o táctico básicamente se decide que rutas construir o mejorar y tal vez que flujo de rollizos puede soportar una determinada ruta de manera de definir restricciones al respecto. En el nivel operativo comienzan a definirse una serie de particularidades que dependen mucho de los diferentes países y de sus regulaciones o leyes. En algunos casos se le entregan a cada transportista su planificación semanal o mensual que respeta ciertas cuotas de transporte definidas mientras que en otros casos los transportistas toman contacto directo con cada empresa de cosecha y se coordinan para evacuar la madera desde el bosque.

En los planes mensuales de transporte es necesario definir las áreas del bosque desde donde se despacharan los productos para cada industria. Una importante herramienta para tomar esta decisión es el clásico problema de transporte que resuelve el problema de flujo entre un punto de origen que oferta una determinada cantidad de producto y un punto de destino que demanda una cierta cantidad del producto y donde hay restricciones de oferta y demanda y el objetivo es minimizar el costo total. Es de vital importancia entonces considerar la distribución geográfica de la oferta y la demanda y el flujo completo de madera de todo el sistema.

Las principales conclusiones del artículo establecen que los requerimientos para poder representar de mejor manera toda la complejidad del flujo de madera del área forestal crecen

cada día, por lo que los conocimientos y herramientas para la resolución de problemas relacionados con la planificación del flujo de madera son cada vez más sofisticados. El desarrollo de herramientas prácticas y robustas que ayuden a la toma de decisiones basadas en modelos de optimización y simulación son muy importantes para poder tener una visión general y soluciones eficientes de problemas altamente complejos de la industria forestal.



CAPÍTULO IV Materiales y métodos

Para resolver el problema presentado en el Capítulo II se propone, un modelo de programación matemática, con la función objetivo de minimizar el costo total de transporte de rollizos que se producen de manera muy dispersa y en diferentes cantidades y calidades según la cantidad de equipos de cosecha que estén operando en cada fundo de producción y la calidad del bosque que se esté cosechando. El modelo considera cinco periodos de tiempo, de los cuales los cuatro primeros representan 1 día duración cada uno y el quinto periodo representa 11 días de duración, lo que en su totalidad representan una quincena de producción y despacho de rollizos. La idea es poder representar con detalle la operación de producción, despacho y transporte de rollizos para los próximos 4 días y adicionalmente entregar una señal para el resto de la quincena de manera de tener una proyección acerca de cómo se producirá el movimiento de rollizos para los próximos 11 días.

El modelo considera la demanda de los diferentes tipos de rollizos en plantas industriales dispersas geográficamente. Las restricciones de demandas no son restricciones duras a cumplir periodo a periodo sino que, el modelo permite que durante los cuatro primeros periodos, se pueda despachar más o menos cargas a un determinado destino pero se debe despachar el total de las cargas demandadas en los cuatro periodos. Esto da una gran flexibilidad al modelo para poder buscar el menor costo de transporte y es posible adelantar o postergar el envío de cargas de rollizos en hasta 4 días sin causar grandes problemas en las operaciones de producción de los destinos. El quinto periodo considera una restricción de demanda que se debe cumplir estrictamente.

El modelo también considera una capacidad limitada de transporte para cada uno de los periodos. La capacidad de transporte, se expresa en horas disponibles de transporte para cada periodo y se construyó una restricción que cuantifica las horas necesarias de transporte para transportar las cargas de cada periodo las que no deben superar el total de horas disponibles para el periodo. Para cuantificar las horas necesarios de transporte se conoce la distancia de la ruta con pavimento y la distancia de la ruta sin pavimento entre cada par origen destino y se consideró que la velocidad promedio de desplazamiento en ruta con pavimento es de 65 kilómetros por hora y la velocidad promedio de desplazamiento en ruta sin pavimento es de 35 kilómetros por hora.

El modelo también considera una cantidad limitada de grúas para el carguío de los rollizos en los fundos de origen y también se consideró que cada grúa tiene una capacidad

máxima de cargas por periodo y una capacidad limitada para desplazarse dentro de una zona geográfica delimitada, ya que son parte de una línea de producción de cosecha y sus costos de operación están incluidos en la tarifa de producción de rollizos, la que a su vez considera que las grúas estén operando en doble turno cada día por lo que tienen un tiempo limitado para el desplazamiento entre fundos. Es decir, el modelo considera que las grúas tienen un radio geográfico de operación limitado en el cual sus costos de operación ya están cubiertos en los costos de cosecha. También se limitó la asignación de grúas a un máximo de 2 grúas por fundo en cada periodo, esto debido a que es operacionalmente muy complejo poder coordinar el movimiento de camiones dentro de un fundo con más de dos puntos de carguío además de producirse un fuerte rechazo por parte de las comunidades vecinas a los fundos frente a un alto tráfico de camiones.

El modelo también considera que el stock de cada producto en cada fundo para cada periodo se construye con el stock del periodo, que representa la producción del periodo, más el stock que podría haber quedado disponible en el periodo anterior producto de que se decidió no despachar todas las cargas.

Finalmente, el modelo restringe la cantidad de cargas en stock, para cada periodo, que puede haber en fundos que se estén cosechando con líneas de producción de torres. Este sistema de cosecha es necesario en sectores montañosos, donde la topografía hace necesario instalar torres con cables de acero para extraer los árboles, los cuales son posteriormente trozados y apilados en sectores muy estrechos. Por este motivo el stock debe ser permanentemente bajo, ya que de lo contrario esto impide que se pueda continuar produciendo rollizos por falta de espacio para almacenarlos. La restricción genera que el modelo deba realizar el despacho de cargas constantemente desde estos fundos a pesar de que vaya en contra de minimizar el costo de transporte.

4.1 Modelamiento matemático

4.1.1 Conjunto de índices del modelo:

i: Conjunto de fundos en los cuales se encuentran los rollizos. $i = \{1, \dots, 42\}$

i_n : Subconjunto de fundos que pertenecen al área geográfica *n* en los cuales se encuentran los rollizos. $i_n = \{1, \dots, 10\}$

j: Conjunto de plantas industriales que demandan los rollizos. $j = \{1, \dots, 37\}$

k : Conjunto de rollizos que se clasifican según largo, diámetro y calidad. $k = \{1, \dots, 13\}$

t : Conjunto de periodos de tiempo. $i = \{1, \dots, 5\}$

$t3_{(t)}$: Subconjunto de periodos que considera los periodos 2,3 y 4. $t3 = \{2, \dots, 4\}$

$t4_{(t)}$: Subconjunto de periodos que considera solamente el cuarto periodo. $T4 = \{4\}$

$t1_{(t)}$: Subconjunto de periodos que considera solamente el primer periodo. $t1 = \{1\}$

$t-1_{(t)}$: Subconjunto de periodos previos a cada periodo. $t-1 = \{t_{-1}, \dots, t_{n-1}\}$

$w_{(t)}$: Subconjunto de periodos que considera los primeros 4 periodos. $w = \{1, \dots, 4\}$

$q_{(t)}$: Subconjunto de periodos que considera solamente el quinto periodo. $q = \{5\}$

$ito_{(i)}$: Subconjunto de fundos que tienen oferta de rollizos que se produjeron con equipo de cosecha torres. $ito = \{1, \dots, 12\}$

4.1.2 Parámetros del modelo:

La unidad de medida para representar la cantidad de rollizos es el número de cargas. Una carga equivale a la capacidad estándar de un camión que es de 28 metros cúbicos de rollizos. Los parámetros utilizados en el modelo son los siguientes:

a_{itk} : Stock de rollizos, expresado en número de cargas, el fundo i , en el periodo t del producto k .

b_{jtk} : Demanda de rollizos, expresado en número de cargas, en el destino j , durante el periodo t , del producto k .

C_{ij} : Costo unitario de transporte, expresado en dólares por carga, entre el fundo i y el destino j .

$dpav_{ij}$: Distancia de pavimento, expresada en kilómetros, entre el fundo i y el destino j .

$dnpav_{ij}$: Distancia de no pavimento, expresada en kilómetros, entre el fundo i y el destino j .

$r1$: Capacidad total de transporte, para cada uno de los primeros 4 periodos, expresada en horas.

$r2$: Capacidad total de transporte para el quinto periodo, expresada en horas.

$NumGr_{in}$: Numero de grúas disponibles en el subconjunto de fundos i_n .

$bodto_{itotk}$: Número de cargas máximo que pueden haber en el periodo 4 en los fundos que se cosecharon con torres.

También se consideró que la velocidad promedio de un camión en una ruta de pavimento es de 65 kilómetros por hora y en una ruta que no está pavimentada es de 35 kilómetros por hora.

4.1.3 Variables de decisión del modelo:

X_{ijkt} : Volumen de rollizos, expresado en número de cargas, a enviar desde el fundo i al destino j del producto k en el periodo t . Variable continua.

y_{it} : Cantidad de gruas a asignar en el fundo i en el periodo t . Variable entera.

bod_{itotk} : Volumen de rollizos, expresado en número de cargas, que tendrá el fundo i , en el periodo t del producto k . Variable continua.

Z : Costo total del transporte. Variable lineal.



4.1.4 Modelo matemático:

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t C_{ij} * X_{ijkt} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_j X_{ijkt} - a_{itk} \leq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall t_1 \in t \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_t X_{ijkt} - \sum_t b_{jtk} \geq 0 \quad \forall j, \forall k, \forall w \in t \quad (3)$$

$$\sum_i X_{ijkt} - b_{jtk} \geq 0 \quad \forall j, \forall k, \forall q \in t \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \frac{dpav_{ij}}{65} * X_{ijkt} + \sum_i \sum_j \sum_k \frac{dnpav_{ij}}{35} * X_{ijkt} \leq r1 \quad \forall w \in t \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \frac{dpav_{ij}}{65} * X_{ijkt} + \sum_i \sum_j \sum_k \frac{dnpav_{ij}}{35} * X_{ijkt} \leq r1 \quad \forall q \in t \quad (6)$$

$$\sum_i y_{it} \leq NumGr_{in} \quad \forall i_n \in i, \forall w \in t \quad (7)$$

$$\sum_i y_{it} \leq NumGr_{in} \quad \forall i_n \in i, \forall q \in t \quad (8)$$

$$y_{it} - 2 \leq 0 \quad \forall i, \forall w \in t \quad (9)$$

$$y_{it} - 20 \leq 0 \quad \forall i, \forall q \in t \quad (10)$$

$$\sum_j \sum_k X_{ijkt} - 25 * y_{it} \leq 0 \quad \forall i, \forall w \in t \quad (11)$$

$$\sum_j \sum_k X_{ijkt} - 25 * y_{it} \leq 0 \quad \forall i, \forall q \in t \quad (12)$$

$$\sum_j X_{ijkt} - a_{itk} + bod_{itk} \leq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall t_1 \in t \quad (13)$$

$$\sum_j X_{ijkt} - \sum_{t-1, t} bod_{it-1k} - a_{itk} + bod_{itk} \leq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall t-1 \in t \quad (14)$$

$$\sum_k bod_{itotk} \leq bodto_{itotk} \quad \forall i \in i, \forall w \in t \quad (15)$$

La descripción de la función objetivo y de cada uno de los conjuntos de restricciones son las siguientes:

- (1) La función objetivo minimiza el costo total de transporte, para lo cual considera el costo de transporte entre cada par origen – destino y la cantidad de cargas a transportar entre cada fundo y planta industrial.
- (2) La cantidad total de cargas transportadas durante el primer periodo, a cada destino debe ser menor o igual a la cantidad de cargas disponibles.
- (3) El total de cargas transportadas, de cada producto a cada destino, durante los primeros 4 periodos, debe ser mayor o igual a la cantidad de cargas demandadas, de cada producto en cada destino, durante los primeros 4 periodos. Esta restricción permite que el envío de un determinado producto, en un determinado periodo a un determinado destino no deba ser necesariamente igual a la demanda que tiene dicho destino de un producto particular en un periodo particular. Si obliga que la demanda total de los primeros 4 periodos debe ser satisfecha. Esto permite al modelo aplazar o adelantar entregas, según conveniencia, para lograr el menor costo total de transporte.
- (4) El total de cargas transportadas, de cada producto a cada destino, durante el quinto periodo, debe ser mayor o igual a la cantidad de cargas demandadas, de cada producto en cada destino, durante el quinto periodo. Para el estudio de caso en el quinto periodo se consideró, toda la producción y demanda de rollizos, para 11 días.
- (5) El total de horas de transporte, para cada uno de los primeros cuatro periodos, debe ser menor o igual a la capacidad total de transporte, para cada uno de los primeros cuatro periodos. Las horas de transporte requeridas, se cuantifican considerando la distancia en caminos con pavimento y sin pavimento entre cada par origen – destino y una velocidad promedio de transporte de 65 kilómetros por hora para rutas con pavimento y una velocidad promedio de 35 kilómetros por hora para rutas sin pavimento.
- (6) El total de horas de transporte, para el quinto periodo, debe ser menor o igual a la capacidad total de transporte para el quinto periodo.
- (7) La cantidad de grúas a asignar, en cada subgrupo de fundos y en cada uno de los primeros 4 periodos, debe ser menor o igual al número de grúas disponibles en cada subgrupo de fundos para cada uno de los primeros 4 periodos.

- (8) La cantidad de grúas a asignar, en cada subgrupo de fondos para el quinto periodo, debe ser menor o igual al número de grúas disponibles en cada subgrupo de fondos para el quinto periodo.
- (9) No se puede asignar más de dos grúas, en un mismo fondo para cada uno de los primeros cuatro periodos.
- (10) No se puede asignar más de veintidós grúas, en un mismo fondo para el quinto periodo.
- (11) La capacidad máxima de cargas, que puede despachar cada grúa, durante cada uno de los primeros 4 periodos es 25 cargas.
- (12) La capacidad máxima de cargas, que puede despachar cada grúa, durante el quinto periodo es 275 cargas.
- (13) La cantidad total de cargas transportadas durante el primer periodo más la bodega de cada fondo y producto para el primer periodo debe ser menor o igual al stock de rollizos para cada fondo y producto en el periodo uno. Con estas restricciones el modelo decide el número de cargas de cada fondo y producto para el periodo uno y de esta manera también, cuantifica el número de cargas de cada bodega en el periodo uno el cual puede ser cero o como máximo el stock inicial de cargas del fondo, si se decide no transportar desde un determinado origen.
- (14) El volumen de rollizos a enviar desde cada fondo, más el stock de rollizos del mismo periodo más, la bodega que podría haber quedado en el periodo inmediatamente anterior menos la bodega que quedara en el periodo en curso debe ser mayor o igual a cero. Estas restricciones solamente balancea las bodegas en cada periodo y coloca a disposición para el transporte la bodega de productos que podrían no haber sido vaciadas el periodo anterior. En la figura número 5 se representa, la relación entre los stocks, las bodegas y el transporte de productos.

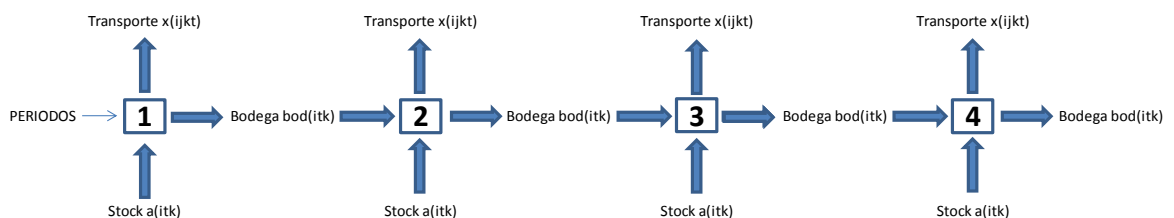


Figura 5: Balance de cargas durante los primeros 4 periodos.

- (15) Establece que las bodegas del subgrupo de fundos que tienen cosecha con torres de madereo deben tener una cantidad de cargar menor o igual 80 en cada uno de los primeros cuatro periodos.

Para el desarrollo de la tesis se realizó un estudio de caso utilizando el modelo en la empresa forestal Chilena Mininco S.A. Los parámetros para el estudio de caso se obtuvieron de la siguiente manera:

- **Costo de transporte (C_{ij}):** El costo de transporte, expresado en dólares por carga, se calculó considerando los kilómetros por tipo de carpeta (con y sin pavimento) entre cada origen y destino y el costo del movimiento de la madera sobre camión.
- **Distancia de pavimento: ($D_{pav_{ij}}$):** La distancia de pavimento, expresada en kilómetros, entre cada par origen y destino se determinó según la cartografía digital que posee la empresa.
- **Distancia de camino sin pavimento: ($D_{npav_{ij}}$):** La distancia de camino sin pavimento, expresada en kilómetros, entre cada par origen y destino se determinó según la cartografía digital que posee la empresa.
- **Stock de rollizos (A_{itk}):** El stock de rollizos, expresado en número de cargas, se determinó según el stock real de la empresa durante un determinado periodo de tiempo. El total de cargas en cada periodo de tiempo tiene implícito el nivel de producción promedio de la empresa según cada tipo de producto, lo que depende de la cantidad de líneas de cosecha y del tipo de bosque que se esté cosechando.
- **Demanda de rollizos (B_{jtk}):** La demanda de rollizos, expresado en número de cargas, se determinó según el consumo disponible de cada planta industrial que abastece la empresa forestal durante un determinado periodo de tiempo.
- **Capacidad total de transporte ($R1_{t(w)}$):** La capacidad total de transporte para los primeros 4 periodos, expresada en horas se determinó según la cantidad de camiones que la empresa tiene contratados y según la modalidad de contrato en donde existe una flota que trabaja un turno y una flota que trabaja doble turno. El mismo método de cálculo se aplicó para determinar el parámetro $R2_{t(q)}$ que representa la capacidad de transporte para el quinto periodo, expresado en horas.
- **Número de grúas disponibles ($NumGr_{in}$):** El Numero de grúas disponibles en el subgrupo de fundos i_n se definió según la cantidad de grúas que la empresa tiene contratada y según el barrio en que estas pueden movilizarse sin costo adicional definidos en el contrato.

- **Número de cargas máximo en fundos de cosecha con torres (Bodto_{itow}):** El número de cargas máximo que existe en cada uno de los primeros 4 periodos en los fundos que se cosecharon con torres, se determinó, según la superficie que poseen las zonas de arrumado asociadas a las torres de madereo y que por consiguiente solo permiten tener una cantidad limitada de volumen de rollizos lo que implica que deben ser evacuadas permanentemente.

Los parámetros de velocidad de un camión en rutas de pavimento y no pavimento, corresponden al promedio de velocidad que determinó la empresa según una extensa base de datos de velocidad alimentada por mediciones con GPS.

Se definieron 12 diferentes escenarios para comprobar la consistencia del modelo matemático. Los escenarios representan situaciones reales de la operación diaria en cuanto a la magnitud de cambio de los parámetros utilizados en el modelo. Los diferentes escenarios sufren cambios en un solo parámetro respecto del escenario 1 o escenario base, de esta manera, es posible por una parte evaluar la factibilidad del escenario planteado y los costos de operación que conlleva. De esta manera, se pretende demostrar que es posible convivir con una serie de cambios en relación al: stock, demanda de cargas y la capacidad de transporte y carguío, afectando, sin lugar a dudas el costo de la operación pero logrando un balance en el movimiento de las cargas que permite, cumplir la demanda de cada cliente y analizar de manera rápida el impacto tanto en costos como en la operación.

4.2 Escenarios de prueba

Los escenarios de prueba utilizadas para el modelo matemático están resumidos en la tabla 2:

Tabla 2: Escenarios de prueba utilizados.

ESCENARIO (ESC)	Stock de rollizos (cargas)	Demanda de rollizos (cargas)	Horas camion disponibles		Número de gruas disponibles	
			Para cada uno de los primeros 4 periodos	Para el quinto periodo	Para cada uno de los primeros 4 periodos	Para el quinto periodo
1	8.191	4.086	1.200	13.200	62	440
2	= ESC 1	= ESC 1	No acotado	No acotado	No acotado	No acotado
3	+30% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
4	-30% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
5	= ESC 1	+30% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
6	= ESC 1	-30% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
7	= ESC 1	= ESC 1	+5% c/r a ESC 1	+5% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
8	= ESC 1	= ESC 1	+10% c/r a ESC 1	+10% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
9	= ESC 1	= ESC 1	-5% c/r a ESC 1	-5% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
10	= ESC 1	= ESC 1	-10% c/r a ESC 1	-10% c/r a ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
11	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	- 1 grua por barrio c/r a ESC 1	-10% de gruas por barrio c/r a ESC 1
12	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	+ 1 grua por barrio c/r a ESC 1	+10% de gruas por barrio c/r a ESC 1
13	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
14	= ESC 1	= ESC 1	763	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1
15	4086	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1	= ESC 1

El escenario 1 o escenario base, representa una situación promedio del día a día, en donde se dispone de un stock de 8.191 cargas, distribuidas en cada uno de los 13 diferentes productos y los 42 fundos de origen que se encuentran dispersos geográficamente. La demanda de cargas es de 4.086 cargas, que demandan alguna de las 37 plantas industriales. Para cada día se dispone de 1.200 horas camión, para transportar los rollizos y 62 grúas, dispersas en cada uno de las 10 áreas geográficas, para cargar los rollizos de madera sobre los camiones. Es un escenario holgado pero, se debe considerar que no todos los destinos demandan todos los productos ni la misma cantidad de cargas. Adicionalmente, esta holgura representa una dificultad mayor para resolver la asignación cuando no se dispone de un

modelo matemático lo que muchas veces conlleva, que se asigne exceso de cargas a un destino desfavoreciendo a otro o activando grúas innecesariamente.

El escenario 2 considera, que las horas camión para el transporte de las cargas y la cantidad de grúas son ilimitadas. Es solo un escenario teórico, que servirá de referencia para comprobar la consistencia del modelo, ya que dada la misma demanda, sería imposible encontrar una solución de menor costo. De igual manera, también sirve como referencia en relación a la cantidad de horas camión utilizadas y la cantidad de grúas disponibles en los siguientes escenarios.

Los escenarios 3 y 4, varían el stock de cargas disponibles, en los fondos a ser transportadas en +/- 30% respectivamente respecto al escenario 1. Esto genera, que los 3 productos que no tienen sustitutos en las fábricas queden sin holgura, es decir, la demanda es igual a la oferta lo que obliga a transportar el 100% de las cargas disponibles generando una restricción dura al modelo. Esta es una situación que ocurre con relativa frecuencia ya que los productos que no presentan sustitutos son escasos, por las altas normas de calidad que deben cumplir los rollizos.

Los escenarios 5 y 6, varían la demanda de cargas en los destinos en +/- 30% respectivamente, respecto al escenario 1. Esta también, es una situación relativamente frecuente y responde básicamente a mejoras en los precios de venta de los productos que elabora la industria o bien a problemas de rendimiento en la industria, que con la demanda inicial de cargas, no logra obtener los productos planificados y debe cumplir estrictas fechas de producción para luego embarcar los productos finales. El escenario 5, plantea una dura restricción ya que debe cumplir una demanda 30% mayor con el mismo stock de rollizos lo que genera que 4 de los 13 productos queden con menos de 2 cargas de holgura entre el stock y la demanda modelada.

Los escenarios 7, 8, 9 y 10, varían la capacidad de transporte en + 5-10 % y - 5-10 % respectivamente respecto al escenario 1. Variaciones en la capacidad de transporte también, son situaciones habituales, ya sea por fallas mecánicas o por falta de conductores para operar todos los camiones.

Los escenarios 11 y 12, varían la capacidad de carguío disminuyendo o aumentando la cantidad de grúas disponibles en cada área geográfica, situación que también es habitual debido tanto a fallas mecánicas como a falta de operadores.

Los últimos 3 escenarios corresponden a escenarios de borde para los primeros 4 periodos de manera de poder revisar el comportamiento del modelo en escenarios límites y además cuantificar el costo de transporte.

En el escenario 13, el modelo pierde la flexibilidad de poder adelantar o retrasar los despachos de rollizos en hasta 4 periodos, es decir, se debe despachar exactamente la cantidad demandada en cada periodo. En el escenario 14 se definió una capacidad de transporte de 763 horas camión, para cada uno de los primeros 4 periodos. Esta capacidad de transporte corresponde a la mínima capacidad que aun hace factible el escenario 1 o escenario base y para determinar esta capacidad de transporte se realizaron sucesivas corridas de aproximación evaluando la factibilidad del escenario 1. El escenario 15 tiene la demanda exactamente calzada con la oferta para cada uno de los 13 productos.



CAPITULO V Resultados

La tabla número 3, muestra el resumen de los resultados, tanto del escenario 1 o escenario base, que servirá de patrón para comparar los resultados obtenidos en cada uno de los siguientes 11 escenarios y los resultados del escenario 2 o escenario teórico.

Tabla 3: Resultados escenarios 1 y 2.

		Base real	Base teorico
		1	2
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	13.542.326
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	27.085
CARGAS TOTALES		4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	6,63
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	163
	Periodo 2	1.200	959
	Periodo 3	1.200	2.241
	Periodo 4	1.200	2.131
	Periodo 5	12.162	13.370
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	58
	Periodo 2	49	58
	Periodo 3	47	58
	Periodo 4	47	62
	Periodo 5	210	924
Tiempo de resolución (seg)		17,56	17,78

El escenario 1, logra un costo de transporte de 6,91 dólares por carga y utiliza durante los primeros 4 días el 100% de la capacidad de transporte y proyecta utilizar, sólo el 92% de la capacidad de transporte para los próximos 11 días. Por su parte las grúas logran una utilización promedio de 77% durante, los próximos 4 días y se esperan bajar la utilización de las grúas a 48% durante los próximos días.

El escenario 2, logra un menor costo de 4% con respecto al escenario base, pero hay que recordar que este escenario considera ilimitada capacidad de transporte y carguío, lo que genera el menor costo de todos los escenarios con la misma demanda. El resultado de escenario 2, muestra una marcada tendencia a esperar futuros periodos para realizar el transporte de los rollizos, lo anterior, debido a que los fondos que comenzaran a tener stock permiten encontrar una mejor combinación origen/destino permitiendo reducir los costos de transporte. Sin embargo la necesidad de transporte se encuentra completamente desbalanceada

ya que requiere aumentar la capacidad de transporte en más de 5 veces desde el periodo 1 al 2 y en más del doble del periodo 2 al 3. En relación a las grúas, los resultados muestran la misma tendencia que en el transporte, no con tan marcadas diferencias en cada uno de los primeros periodos pero si muestra que utiliza más grúas que las utilizadas en el escenario base. Esta extrema flexibilidad, en relación a la capacidad de carguío y transporte, es prácticamente imposible de lograr en la realidad, sin embargo es interesante rescatar la posibilidad de poder contar con algún grado de flexibilidad en la capacidad de carguío y transporte de manera de poder realizar programas de transporte con mayor o menor capacidad para poder retrasar o adelantar el transporte de rollizos y de esta manera reducir los costos.

Tabla 4: Resultados escenarios 1, 3 y 4.

		Base real	Cambios en el stock	
		1	3	4
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	13.991.624	14.600.137
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	27.983	29.200
CARGAS TOTALES		4.086	4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	6,85	7,15
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	1.200	1.200
	Periodo 2	1.200	1.200	1.200
	Periodo 3	1.200	1.200	1.200
	Periodo 4	1.200	1.200	1.200
	Periodo 5	12.162	12.162	12.162
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	48	49
	Periodo 2	49	48	50
	Periodo 3	47	49	50
	Periodo 4	47	47	47
	Periodo 5	210	210	210
Tiempo de resolución (seg)		17,56	17,09	18,12

Los escenarios 3 y 4, que consideran variaciones en el stock de rollizos logran diferencias de -1% y +3% del costo de transporte en comparación con el escenario base. Si bien es esperable que al aumentar la disponibilidad de cargas en un 30% en el escenario 3 el costo de flete baje, es importante rescatar el orden de magnitud en relación a la variación del costo. Por su parte, el escenario 4, que reduce la cantidad de cargas en un 30% en comparación al escenario base genera un sobre costo 3% mayor que el escenario 1.

Aumentar la disponibilidad de cargas en un 30% requiere de un aumento significativo en la producción, que requiere extender turnos de producción o bien contratar líneas

adicionales de producción. Cualquiera de las alternativas, tiene un sobre costo mucho mayor a los 0,06 dólares por carga (-1% en comparación al escenario base) que se reduce el costo de transporte en comparación al escenario base.

Tabla 5: Resultados escenarios 1, 5 y 6.

		Base real	Cambios en la demanda	
		1	5	6
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	22.290.286	9.308.595
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	44.581	18.617
CARGAS TOTALES		4.086	5.311	2.860
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	8,39	6,51
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	1.200	244
	Periodo 2	1.200	1.200	965
	Periodo 3	1.200	1.200	1.200
	Periodo 4	1.200	1.200	1.200
	Periodo 5	12.162	13.200	10.022
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	50	44
	Periodo 2	49	51	45
	Periodo 3	47	50	49
	Periodo 4	47	50	47
	Periodo 5	210	241	178
Tiempo de resolución (seg)		17,56	20,04	15,61

Los escenarios 5 y 6 que varían la demanda de cargas en un +/- 30% respectivamente son relativamente comunes, debido a variadas causas, entre las que se cuenta, la necesidad de poder ingresar con más cargas de rollizos producto de que las plantas industriales se encuentran procesando un determinado tipo de rollizo y no han logrado obtener la cantidad de productos programado para el próximo embarque y requieren, con urgencia el ingreso de cargas adicional de rollizos para poder terminar la producción a tiempo. Por el contrario, caídas en la demanda de cargas, sin ser tan habitual, puede presentarse frente a fallas inesperadas en las plantas industriales que requiere detener el despacho de cargas para reparar la falla. El escenario 5, plantea una dura restricción al modelo ya que aumenta la demanda de cargas en un 30% con respecto al escenario base y mantiene sin variaciones el stock de rollizos y la capacidad de carguío y transporte. Los rollizos de mayor calidad, que presentan una alta demanda y por lo general bajo stock en fondos, queda sin holguras entre stock y demanda generando un escenario crítico. El modelo logra encontrar una solución factible que tiene un costo adicional de 21% con respecto al escenario base. Las capacidades de transporte,

son utilizadas al 100% tanto en cada uno de los primeros 4 días como en los restantes 11 días. En la misma línea, este escenario requiere activar la mayor cantidad de grúas todos los escenarios para poder cargar los camiones, en promedio un 81% de las grúas deben ser utilizadas durante cada uno de los primeros 4 días. El tiempos de resolución también es el más alto de todos los escenarios, mostrando que el modelo se encuentra en una situación más compleja que los otros escenarios.

Por el contrario el escenario 6, con un 30% menos de demanda de rollizos que el escenario base, resulta con un costo 6% menor que el escenario base.

Tabla 6: Resultados escenarios 1, 7, 8, 9 y 10.

		Base real	Cambios en la capacidad de transporte			
		1	7	8	9	10
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	14.077.404	14.059.540	14.175.396	14.278.939
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	28.155	28.119	28.351	28.558
CARGAS TOTALES		4.086	4.086	4.086	4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	6,89	6,88	6,94	6,99
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	1.260	1.320	1.140	1.080
	Periodo 2	1.200	1.260	1.320	1.140	1.080
	Periodo 3	1.200	1.260	1.320	1.140	1.080
	Periodo 4	1.200	1.260	1.320	1.140	1.080
	Periodo 5	12.162	12.162	12.162	12.162	12.162
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	47	49	49	48
	Periodo 2	49	47	48	47	49
	Periodo 3	47	49	49	48	50
	Periodo 4	47	48	46	47	46
	Periodo 5	210	210	210	210	210
Tiempo de resolución (seg)		17,56	17,89	17,46	17,60	17,90

Los escenarios 7, 8, 9 y 10 consideran modificaciones a la capacidad de transporte con respecto a escenario bases. Los escenarios 7 y 8 consideran +5% y +10% de capacidad de transporte con respecto al escenario 1. La mayor disponibilidad de transporte, permite encontrar una combinación origen/destino que tiene un 2 centavos de dólar más barato que el escenario base, en el mismo sentido el escenario 8 continua reduciendo los costos de transporte al disponer de mayor capacidad de transporte, pero aun en forma más marginal en comparación al escenario base que el escenario 8. Ambos escenarios en conjunto, permiten mostrar que la capacidad estándar de transporte del escenario base, está prácticamente en el techo del óptimo económico, ya que si bien, continuar aumentado la capacidad de transporte permite reducir los costos, esta reducción es muy marginal. Esto también se corrobora al

comparar, la cantidad de horas camión utilizadas en el escenario 2, que no tenía límites en cuanto a la capacidad de transporte, es decir que en este escenario las horas camión utilizadas son las óptimas para lograr el menor costo de transporte posible y las horas camión utilizadas en los escenarios 7 y 8 que representan el 92% y 96% respectivamente con respecto al escenario 2 para los primeros 4 días y 91% para los restantes 11 días.

Por el contrario los escenarios 9 y 10 consideran -5% y -10% de capacidad de transporte con respecto al escenario 1. La menor disponibilidad de transporte hace subir los costos de transporte en torno al 1% pero nuevamente los movimientos en los costos son bastante marginales.

De estos 4 escenarios es posible analizar que modificaciones de +/-10% en la capacidad de transporte, que para estos escenarios se traduce en +/- 240 horas camión día, no generan fuertes impactos en los costos de transporte. Esto se debe a la alta flexibilidad que tiene el modelo en cuanto a adelantar o desplazar las entregas de las cargas, en hasta 4 días. Esto permite acomodar el despacho diario de cargas según la capacidad de transporte y de esta manera cumplir al 4° día con todos los clientes a costos levemente mayores o menores a los obtenidos con la capacidad estándar de transporte.

Tabla 7: Resultados escenarios 1, 11 y 12.

		Base real	Cambio cantidad de gruas	
		1	11	12
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	14.163.956	14.096.765
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	28.328	28.194
CARGAS TOTALES		4.086	4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	6,93	6,90
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	1.200	1.200
	Periodo 2	1.200	1.200	1.200
	Periodo 3	1.200	1.200	1.200
	Periodo 4	1.200	1.200	1.200
	Periodo 5	12.162	11.936	12.141
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	41	51
	Periodo 2	49	40	52
	Periodo 3	47	38	53
	Periodo 4	47	38	54
	Periodo 5	210	188	226
Tiempo de resolución (seg)		17,56	19,62	18,50

Por último, los escenarios 11 y 12 consideran modificaciones sobre la cantidad de grúas disponibles, por área geográfica, para el carguío de camiones. El escenario 11, considera 1 grúa menos por zona geográfica, para cada uno de los primeros 4 días, con respecto al escenario base. La menor disponibilidad de grúas, supone la necesidad de generar un conjunto de pares origen/destino distinto al escenario base, producto de la imposibilidad de cargar en ciertos fundos. Si bien, el costo de transporte del escenario 11 es mayor al del escenario base es solo un 0,3% más alto. Efecto contrario, pero en igual orden de magnitud se observa en los resultados del escenario 12. La alta disponibilidad de grúas que considera el escenario base y la posibilidad de adelantar o retrasar la entrega de cargas en hasta 4 días permite que cambios en la capacidad de carguío, puedan ser absorbidos por el sistema sin fuertes impactos en los costos de transporte.

Adicionalmente a los 12 escenarios ya presentados y resueltos se realizaron plantearon 3 escenarios adicionales que corresponden a escenarios de borde para los primeros 4 periodos del modelo.

Como se ha planteado en varias oportunidades, el modelo desarrollado permite el adelanto o el atraso en el despacho de las cargas hasta en 4 días como máximo. Esto, permite dar libertad al modelo para poder encontrar el conjunto de combinaciones origen/destino que minimice el costo total de transporte. Para poder cuantificar la magnitud del costo adicional que supone no tener esta libertad de adelantar o atrasar la entrega de cargas, se corrió el escenario 13, con los mismos parámetros del escenario 1 o escenario base y se modificó el modelo para restringir a que las cargas demandadas de cada producto en cada destino, debieran ser entregadas, en el mismo periodo que se demandaban.

Tabla 8: Resultados escenarios 1 y 13.

		Base real	Dda Fija
		1	13
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	15.229.021
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	30.458
CARGAS TOTALES		4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	7,45
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	1.200
	Periodo 2	1.200	1.200
	Periodo 3	1.200	1.200
	Periodo 4	1.200	1.200
	Periodo 5	12.162	13.200
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	48
	Periodo 2	49	32
	Periodo 3	47	32
	Periodo 4	47	32
	Periodo 5	210	155
Tiempo de resolución (seg)		17,56	17,89

El costo de flete del escenario 13 o escenario con demanda fija, en donde no se permite el adelanto o el retraso en la entrega de cargas es 7,9% mayor que el escenario base, lo que equivale a 0,54 dólares por carga.

El escenario 14, tiene los mismo parámetros que el escenario 1 pero un 36% menos de capacidad de transporte para cada uno de los primeros 4 periodos, lo que reduce las horas camión disponibles por periodo de 1.200 horas a 763 horas. Luego de realizar sucesivas corridas de aproximación se determinó que el escenario 1 no puede ser resuelto con menos de 763 horas camión para cada uno de los primeros 4 periodos. Esta baja en la disponibilidad de transporte genera un alza en el costo promedio de transporte de 25% con respecto al escenario 1. Si bien, es poco probable que la disponibilidad de transporte se reduzca en un 36% debido a menor cantidad de camiones producto de fallas mecánicas, es posible que esto ocurra producto de huelga. El modelo desarrollado permite encontrar una solución factible gracias a la flexibilidad en el despacho de las cargas.

Tabla 9: Resultados escenarios 1 y 14.

		Base real	Min Trans
		1	14
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	17.720.896
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	35.442
CARGAS TOTALES		4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	8,67
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	763
	Periodo 2	1.200	763
	Periodo 3	1.200	763
	Periodo 4	1.200	763
	Periodo 5	12.162	13.200
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	50
	Periodo 2	49	47
	Periodo 3	47	49
	Periodo 4	47	47
	Periodo 5	210	210
Tiempo de resolución (seg)		17,56	23,60

Finalmente, el escenario 15 también plantea una dura restricción al modelo, ya que considerando los mismos parámetros que el escenario 1 pero calza la oferta y la demanda, de cada uno de los productos, reduciendo la oferta solamente a las 4.086 cargas demandadas. El modelo, continuo teniendo la posibilidad de adelantar o retrasar el despacho de cargas en hasta 4 periodos, pero al término del cuarto periodo obligatoriamente deberá haber despachado todas las cargas disponibles. Esto aumenta el costo de transporte en un 16% con respecto al escenario 1 lo que se traduce en 1,08 dólares más por carga.

Tabla 10: Resultados escenarios 1 y 15.

		Base real	Dda calzada
		1	15
Valor Función Objetivo (\$)		14.113.487	16320976
Valor Función Objetivo (U\$)		28.227	32.642
CARGAS TOTALES		4.086	4.086
Costo por carga transportada (U\$)		6,91	7,99
Horas camion utilizadas	Periodo 1	1.200	1.200
	Periodo 2	1.200	1.200
	Periodo 3	1.200	1.200
	Periodo 4	1.200	1.200
	Periodo 5	12.162	13.200
Número gruas utilizadas	Periodo 1	47	43
	Periodo 2	49	44
	Periodo 3	47	42
	Periodo 4	47	39
	Periodo 5	210	198
Tiempo de resolución (seg)		17,56	18,93

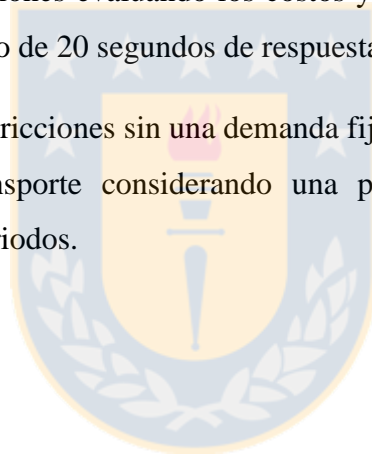


CAPITULO VI Conclusiones

El problema descrito en este trabajo es un problema muy complejo de resolver basándose en la experiencia. El modelo matemático construido y detallado en este trabajo, es la primera aproximación propuesta para mejorar la solución actualmente usada por lo que en un trabajo futuro se analizara la función objetivo para que refleje la complejidad del problema real.

El modelo desarrollado, resuelve todas las instancias planteadas de manera exacta, lo que permite su uso como una herramienta para la ayuda a la toma de decisiones frente al problema de la planificación diaria de grúas y camiones para el despacho de rollizos, logrando encontrar soluciones a diferentes escenarios, conociendo primero la factibilidad de cada cual y los costos asociados. Ósea conocer el cumplimiento de entrega a cada cliente, anticipándose a los problemas. Evaluar cambios en las demandas o en las capacidades de carguío y transporte de manera de poder decisiones evaluando los costos y las entregas a cada cliente en tiempos computacionales promedio de 20 segundos de respuesta.

El conjunto de restricciones sin una demanda fija por periodo permite, balancear el uso de la capacidad de transporte considerando una posterior programación del transporte equitativa en todos los periodos.



CAPÍTULO VII

REFERENCIAS

- [1] Multi – commodity supply network planning in the forest supply chain. Satyaveer S. Chauhan, Jean Marc Frayret & Luc LeBel. *European Journal of Operational Research*. 196 (2009), 688-696.
- [2] Supply chain management in forestry – case studies at Sodra Cell AB. Dick Carlsson & Mikael Ronnqvist. *European Journal of Operational Research*. 163 (2005), 589-616.
- [3] Optimal forest transportation with respect to road investments. Leif Olsson & Peter Lohmander. *Forest Policy and Economics*. 7 (2005), 369-379.
- [4] Supply chain modelling of forest fuel. Helene Gunnarsson, Mikael Ronnqvist & Jan T. Lundgren. *European Journal of Operational Research*. 158 (2004), 103-123.
- [5] A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain – A case study in the Chilean forest industry. Juan Troncoso, Sophie D´Amours, Patrick Flisberg, Mikael Rönqvist, Andrés Weintraub. Cirrelet-2011-28. May 2011.
- [6] Forestry optimization. Mikael Rönqvist. Published on line Springer – Verlag 2003. May 28, 2003.
- [7] Applying an integrated logistics network design and optimisation model_ the Pirelli Tyre case. Alessandro Creazza, Fabrizio Dallari & Tommaso Rossi. *International Journal of Production Research*. 50:11, 3021-3038 (2011).
- [8] A Paired Combinatorial Logit Route Choice Model with probit-based equivalent impedance. Li Jun, Lai Xinjun & Yu Zhi. *Journal of transportation systems engineering and information technology*. Volume 13 (2013).
- [9] An integrated modeling framework for design of logistics networks with expedited shipment services. Xiaopeng Li. *Transportation research part E*. 56 (2013) 46-63.
- [10] The primary forest fuel supply chain. A literature review. Ulrich J Wolfsmayr, Peter Rauch. *Biomass & Energy*. 6 (2014) 230-221.

- [11] Finding a minimum cost path between a pair of nodes in a time-varying road network with a congestion charge. Liang Wen, Bulet Catay, Richard Eglese. *European Journal of Operational Research*. 236 (2014) 915-923.
- [12] Global optimization method for mixed transportation network design problem. A mixed-integer linear programming approach. Paramet Luathep, Agachai Sumalee, William H.K. Lam, Zhi-Chun Li, Hong K. Lo. *Transportation Research Part B*. 45 (2011) 808–827.
- [13] Vehicle routing problems with alternative paths: An application to on-demand transportation. Thierry Garaix, Christian Artigues, Dominique Feillet, Didier Josselin. *European Journal of Operational Research*. 204 (2010) 62–75.
- [14] Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review. Nazanin Shabani, Shaghaygh Akhtari, Taraneh Sowlati. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 23(2013)299–31.
- [15] Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming. Juan J. Troncoso, Rodrigo A. Garrido. *Forest Policy and Economics* 7 (2005) 625– 633.
- [16] Designing a regional forest fuel supply network. Manfred Gronalt, Peter Rauch. *Biomass and Bioenergy* 31 (2007) 393–402.
- [17] Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice. Pamela Murray-Tuite, Brian Wolshon. *Transportation Research Part C*. 27 (2013) 25–45.