

Planificación de la cosecha forestal

Poyecto de grado de Ingeniería de Producción

Diego Mudraz Terzaghi

Leandro Hernández Fernández Chaves

Joaquín Ignacio Fernández Núñez

Tutor: Carlos Testuri

Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Mayo de 2021

Agradecimientos

Como proceso de consolidación de finalización de la carrera de quienes escribieron este informe, no podemos dejar de recordar a ciertas personas que hicieron posible el camino recorrido para llegar al mismo.

El tránsito de aprendizaje a través de la educación pública, no es uno que se recorre solo. A lo largo del mismo surgen distintos tipos de obstáculos, que por su naturaleza no se pueden superar sin apoyo. Es por ello que queremos agradecer a aquellas personas y allegados que fueron parte de este recorrido.

En primer lugar queremos agradecer a nuestras familias y amigos. Sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

En segundo lugar a Carlos Testuri, quien fue nuestro tutor para este proyecto. Sus conocimientos, comentarios y sugerencias fueron un valioso apoyo para poder realizar este trabajo.

En tercer lugar, y no por ultimo menos importante, a los profesores que nos acompañaron, enseñaron y transmitieron conocimientos académicos y otros que trascienden más allá de lo estrictamente educativo.

RESUMEN

El presente trabajo aborda el problema de la planificación de la cosecha forestal relativo a la tala de los cultivos en coordinación con el transporte de la cosecha. En lo que respecta a la cosecha forestal, la misma se define como una etapa del proceso productivo de la cadena de abastecimiento de productos que tienen a la madera como de materia prima. El problema de su planificación incluye los aspectos silvícolas y de transporte que son parte de la etapa mencionada y puede tratarse de forma estratégica u operativa. Ambos casos tienen el objetivo principal de optimizar los recursos utilizados, asegurando satisfacer una demanda determinada, para diferentes horizontes de planificación. Al problema tratado, se lo modela como una red de nodos (bosques), unidos por arcos (carreteras) y se busca minimizar los costos totales asociados al procesamiento, transporte y almacenamiento de la madera, así como también a la construcción de nuevas carreteras, decidiendo en cada periodo sobre la cantidad de parcelas a cosechar, la cantidad de carreteras a construir, el flujo de materia prima por cada carretera, la cantidad de madera almacenada y la abastecida desde cada almacén. El mismo se establece bajo ciertas restricciones en las que se destacan las de adyacencia entre parcelas y la cosecha única de las mismas para el horizonte de planificación establecido. El problema fue modelado mediante una formulación de programación entero-mixta, donde se implementó computacionalmente y se resolvió mediante el sistema GLPK. Se elaboraron cuatro casos de estudio en los cuales bajo una red establecida, se introdujeron distintos parámetros de demanda y períodos de tiempo. Como cierre del trabajo, se logró realizar con éxito un modelo que se ajuste a la realidad de la problemática planteada con distintos análisis y conclusiones intermedias. Asimismo, el equipo plasmó mediante el relevamiento de información los antecedentes existentes en el área de la industria forestal. Además se identificaron oportunidades de mejora de cara a futuras investigaciones en las que se destacan la introducción de variaciones en el rendimiento de los plantíos y la oportunidad de replantar árboles.

Palabras claves:

cosecha forestal, planificación forestal, diseño de redes, silvicultura, programación entera-mixta, optimización.

Índice general

Lista de figuras	VI
Lista de tablas	VII
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Situación de la Industria Forestal	2
1.2.1 Contexto global	2
1.2.2 Contexto regional	6
1.2.3 Contexto Nacional	8
2 Antecedentes	11
2.1 Investigación de operaciones	11
2.1.1 Problemas silvícolas	12
2.1.2 Problema del transporte	12
2.2 Revisión literaria	13
2.2.1 Criterios de relevamiento	14
2.2.2 Reseña de la literatura utilizada	15
3 Descripción del problema	29
3.1 Problema de la planificación de la cosecha forestal	30
3.2 Modelado algebraico	31
3.2.1 Descripción del modelo	31
3.2.2 Conjuntos	32
3.2.3 Parámetros	32
3.2.4 Variables de decisión	33
3.2.5 Restricciones	33
3.2.6 Función objetivo	35

3.3	Relevamiento y análisis de datos	35
3.4	Validación del modelo	37
3.4.1	Primera instancia	38
3.4.2	Segunda instancia	40
3.4.3	Tercera instancia	42
3.4.4	Cuarta instancia	43
3.4.5	Quinta Instancia	45
3.4.6	Sexta instancia	46
4	Casos de estudio	48
4.1	Red	48
4.2	Tiempo de ejecución	50
4.3	Caso 1	50
4.3.1	Objetivos	50
4.3.2	Descripción de la instancia	50
4.3.3	Análisis y resultados del caso	51
4.4	Caso 2	53
4.4.1	Objetivos	53
4.4.2	Descripción de la instancia	53
4.4.3	Análisis y resultados caso	54
4.5	Caso 3	56
4.5.1	Objetivos	56
4.5.2	Descripción de la instancia	56
4.5.3	Análisis y resultados	57
4.6	Caso 4	59
4.6.1	Objetivos	59
4.6.2	Descripción de la instancia	59
4.6.3	Análisis y resultados del caso	60
4.7	Análisis de sensibilidad	61
4.7.1	Variación del costo unitario de procesamiento en los no- dos origen	62
4.7.2	Variación del costo unitario de almacenamiento en los nodos de salida	64
4.7.3	Variación del costo unitario unitario de transporte . . .	65
5	Conclusiones	68

Bibliografía	72
---------------------	-----------

Apéndices	75
------------------	-----------

Apéndice 1	Código GNU MathProg del Modelo Matemático . . .	76
Apéndice 2	Datos procesados.	81
Apéndice 3	Análisis de partes blandas	82
3.1	Capacidad de recursos humanos	82
3.1.1	Análisis FODA del proyecto	83

Lista de figuras

1.1	Distribución de bosques en países en el año 2020	3
1.2	Distribución de la producción de derivados madereros en el año 2019	4
1.3	Producción de derivados madereros en Uruguay en el año 2019 .	9
3.1	Esquema gráfico de la primera instancia	39
3.2	Esquema gráfico de la segunda instancia	41
3.3	Esquema gráfico de la cuarta instancia	43
4.1	Red utilizada en los casos de estudio	49
4.2	Volumen cosechado y almacenado según Periodo	52
4.3	Volumen almacenado y abastecido según nodo de salida.	53
4.4	Volumen cosechado y almacenado según Periodo	55
4.5	Volumen cosechado y abastecido según Periodo	56
4.6	Volumen cosechado y almacenado según Periodo	58
4.7	Volumen cosechado y almacenado según Periodo	58

Lista de tablas

1.1	Los diez países del mundo con mejor infraestructura de transporte	6
1.2	Once países de la región con mejor infraestructura de transporte	8
3.1	Abastecimiento de la demanda en m^3 según nodo de salida y periodo	44
3.2	Inventario según nodo de salida y período.	45
3.3	Abastecimiento de la demanda en m^3 según nodo de salida y periodo	46
3.4	Inventario según nodo de salida y período.	47
4.1	Demanda de madera según periodo.	50
4.2	Demanda de madera según periodo.	54
4.3	Demanda de madera según periodo.	57
4.4	Volumen almacenado por periodo en el nodo N66	59
4.5	Demanda de madera según periodo.	61
4.6	Valor de la función objetivo según la variación en el costo de procesamiento de madera	63
4.7	Total cosechado y almacenado según variación de costo de procesamiento de madera	63
4.8	MIP gap según variación de costo de procesamiento de madera .	63
4.9	Valor de la función objetivo según variación en el costo unitario de almacenamiento	64
4.10	Valores de MIP gap según tiempo de ejecución y costo unitario de almacenamiento	64
4.11	Total cosechado y almacenado según variación de costo de almacenamiento	65
4.12	Flujo, cosecha y volumen almacenado según variación de costo unitario de transporte.	66

4.13 Valor de la función objetivo según variación de costo unitario de transporte	66
--	----

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se engloban los objetivos del trabajo junto a un análisis situacional de la industria forestal, entendiendo a la misma como el área de impacto de nuestro proyecto. Para esto último, se realiza un racconto del contexto de la mencionada industria, tanto a nivel global como regional y nacional, con un paneo general que abarca a toda la cadena de suministro que involucra la misma, a saber: desde los estados de los bosques que proveen la materia prima, pasando por su procesamiento, la situación de la infraestructura de transporte y los principales usos de la madera, a partir del estudio de los productos que se realizan con ella.

1.1. Objetivos

Se pretende desarrollar un modelo algebraico que atienda al problema de planificar la cosecha forestal, en el que se busca minimizar los costos de ésta mientras se atiende la demanda de madera en un horizonte temporal discreto; dicho problema se detalla en el [Capítulo 3](#). Como objetivos secundarios se buscará contextualizar el trabajo realizado con el cumplimiento de tres hitos concretos: en primer lugar, el análisis de la situación actual de los principales aspectos que lo forman, procurando que las fuentes consultadas no solamente sean fiables sino también actualizadas. En segundo lugar, realizar un resumen del estado del arte del área que engloba al proyecto. Por último, realizar relevamientos de distintos aspectos de la realidad que sean referencia para los conjuntos de datos utilizados y permitan fijar proporciones entre las magnitudes utilizadas en ellos.

1.2. Situación de la Industria Forestal

Se entiende por cosecha forestal al “conjunto planificado de actividades relacionados con la corta, procesamiento y extracción de trozas u otras partes aprovechables de los árboles, para su posterior transformación, considerando sus efectos a corto, mediano y largo plazo sobre los recursos naturales teniendo en cuenta consideraciones sociales” [1].

La definición presentada abarca dentro de sí actividades de distinta índole, que deberán relacionarse en cadena de forma tal que maximicen el rendimiento de la misma, esto es: generar los mayores beneficios económicos posibles dentro de un marco delimitado por las consideraciones ambientales a tener en cuenta. Dichas actividades pueden dividirse en dos grandes grupos: las silvícolas; relacionadas a aquellas que atañen al cultivo, el cuidado y la explotación de los bosques y los montes; y las de transporte; que involucran no solamente el traslado de la madera sino también el mantenimiento y la construcción de redes de carreteras para dicho fin. Ambos grupos se combinan en la toma de decisiones vinculada a la Industria Forestal.

La presente sección busca acercar al lector al estado de situación actual de los tópicos presentados en el párrafo anterior, permitiéndole contextualizar los mismos tanto a nivel global como regional y nacional.

1.2.1. Contexto global

Datos proporcionados por la FAO [2], indican que los bosques abarcan casi un tercio de la superficie total de la tierra. Traducido a números, estos representan un área de 4,060 mil millones de hectáreas (en adelante ha), el equivalente al 31 % de la superficie total de la tierra.

Las zonas tropicales poseen la mayor proporción de los bosques del mundo, alrededor del 45 %. Además el 54 % de los bosques del mundo está concentrado en 5 países: Rusia, Brasil, Canadá, Estados Unidos y China. La figura 1.1 muestra la distribución de los bosques en el mundo, en ella se discrimina a los primeros 10 países en extensión boscosa (que incluyen además de a los 5 mencionados a: Australia, República Democrática del Congo, Indonesia, Perú e India) del resto del mundo.

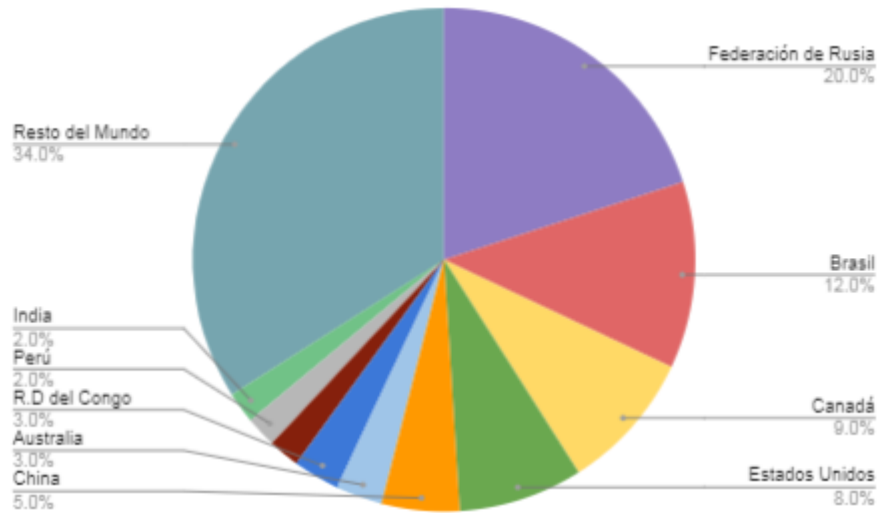


Figura 1.1: Distribución de bosques en países en el año 2020

Por otra parte, si bien existen regiones con crecimiento en el grado de forestación que presentan, se vive a nivel global un proceso de deforestación que más allá de estar reduciendo su tasa de crecimiento, se mantiene como una preocupación hasta nuestros días. Se estima que desde 1990 se han perdido aproximadamente 178 millones de ha de bosque. En este sentido, el protocolo de Kyoto ¹ fija pautas tanto para países desarrollados como en vías de desarrollo sobre prácticas de gestión forestal sostenible y reforestación. Si bien es de las referencias más importantes en el área, no especifica acciones para cumplir con las pautas establecidas. Esta preocupación ha dado lugar a la creación de sistemas de certificación por parte de terceros en la industria, que destaquen el uso sostenible de los recursos, siendo el FSC y el PEFC los principales [3].

La industria forestal clasifica lo que son bosques *regenerados de forma natural* y los *bosques plantados*, datos del sitio web de la FAO [4] muestran que estos representan el 93 % y 7 % respectivamente del total de la superficie forestada en el mundo. Además, dentro de los bosques plantados existe otra clasificación: por un lado están las *plantaciones forestales* que representan el 45 % de los bosques plantados y son aquellas que se manejan de manera intensiva, compuestas por una o dos especies de edad uniforme, plantadas en un espacio regular y principalmente explotadas con fines productivos. Por otro lado se encuentra la categoría de *otros bosques plantados*, completando el res-

¹Protocolo para la reducción de gases de efecto invernadero firmado por 84 países en el año 1998

tante 55 %. Estas plantaciones no se manejan de manera intensiva y su aspecto puede asemejarse a los bosques naturales en su madurez. El fin de estos, puede ser restaurar el ecosistema y la protección de los suelos y agua. A los efectos del área en que se desarrolla esta tesis, los bosques plantados que se alcanzan son las plantaciones forestales, donde éstas abarcan alrededor de 131 millones de ha. A su vez, aproximadamente el 30 por ciento del total de los bosques (1,150 mil millones de ha), se utilizan para la producción de madera y productos forestales no madereros principalmente.

En lo que respecta al consumo, datos extraídos del sitio web de la FAO¹ muestran que en el año 2019, se produjeron en el mundo unas 13 billones de toneladas estimadas de productos derivados de la madera. El principal destino de la misma fue para la fabricación de madera en rollo, seguido por la madera utilizada directamente como combustible, la trozada, la pulpa de celulosa y los tableros de madera.

La figura 1.2 presenta el peso porcentual de los productos mencionados en el total descrito, así como también muestra el porcentaje correspondiente a otros usos de menor relevancia que los presentados y aquel asociado a los residuos madereros generados por la industria forestal.

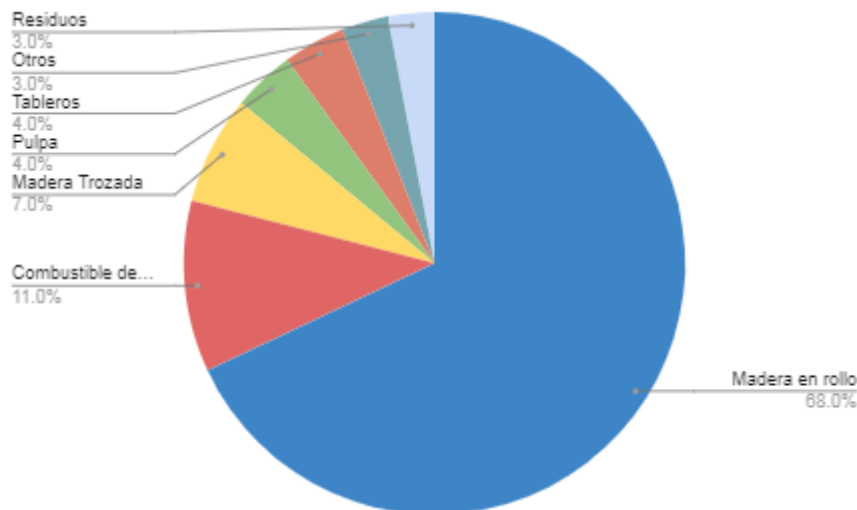


Figura 1.2: Distribución de la producción de derivados madereros en el año 2019

En lo que respecta a la infraestructura de transporte, estudios del Foro Mundial de Economía [5] permiten comparar la misma en 141 países. La eva-

¹<http://www.fao.org/faostat/es/data/FO>, último acceso: 22 de noviembre de 2020

luación se realiza tomando en cuenta ocho categorías diferentes, divididas en cuatro correspondientes al transporte terrestre, dos al marítimo y dos al aéreo. Más allá de que los aspectos evaluados exceden las redes de transporte terrestre que son competencia de este trabajo, el ranking elaborado es un insumo valioso para realizar una estimación aproximada del estado de situación mundial en el tópico.

Las categorías incluidas son las siguientes (las descripciones son traducciones de las originales en inglés, incluidas en el citado estudio):

- Conectividad de Carreteras: mide la velocidad promedio y la rectitud de un itinerario de conducción que conecta a las ciudades que juntas representan al menos el 15 % de la economía del país. La escala va de 0 (pésimo) a 100 (excelente).
- Calidad de Carreteras: Respuesta a la pregunta de la encuesta “*En su país, ¿cuál es el calidad (extensión y condición) de la infraestructura vial?*”. Las respuestas abarcan una escala que va desde 1: extremadamente pobre, entre los peores del mundo a 7: extremadamente bueno, entre los mejores del mundo. Se toma uno entre el promedio ponderado del período 2018-2019 o el período más reciente disponible.
- Densidad ferroviaria: Kilómetros de vía férrea por cada 1.000 kilómetros cuadrados de terreno. Se toma como referencia 2017 o en su defecto el año anterior más reciente disponible.
- Eficiencia de los servicios ferroviarios: Respuesta a la pregunta de la encuesta “*En su país, ¿qué tan eficientes (es decir, frecuencia, puntualidad, velocidad, precio) son los servicios de transporte por tren?*” Donde 1 equivale a extremadamente ineficiente, entre los peores del mundo y 7 a extremadamente eficiente, entre los mejores del mundo, entre estos dos valores se encuentra el rango de evaluación. Se toma uno entre el promedio ponderado de 2018-2019 o el período más reciente disponible.
- Conectividad del aeropuerto: Esto representa el indicador de conectividad del aeropuerto de IATA, que mide el grado de integración de un país dentro de la red mundial de transporte aéreo. Año 2018.
- Eficiencia de los servicios de transporte aéreo: Respuesta a la pregunta de la encuesta “*En su país, ¿qué tan eficientes (es decir, frecuencia, puntualidad, velocidad, precio) son los servicios de transporte aéreo?*” [1 = extremadamente ineficiente, entre los peores del mundo; 7 = extrema-

damente eficiente, entre los mejores del mundo]. Se toma uno entre el período 2018-2019 (promedio ponderado) o período más reciente disponible.

- Conectividad de transporte marítimo: Puntaje en el Índice de conectividad de transporte marítimo de línea, que evalúa la conectividad de un país a las redes de envío globales. El índice utiliza una escala abierta, con la puntuación de referencia de 100 correspondiente al país más conectado en 2004 (China). No se aplica a los países sin litoral. Año 2017.
- Eficiencia de los servicios portuarios: Respuesta a la pregunta de la encuesta "*En su país, ¿qué tan eficientes (es decir, frecuencia, puntualidad, velocidad, precio) son los servicios portuarios (transbordadores, barcos)?*" [1 = extremadamente ineficiente, entre los peores del mundo; 7 = extremadamente eficiente, entre los mejores del mundo]. No se aplica a países sin litoral. Se toma uno entre el período 2018-2019 (promedio ponderado) o el período más reciente disponible.

La tabla 1.1 muestra, del mejor al peor, los diez países con mayor puntuación en esta evaluación. El rango de puntuación va desde 0 a 100.

Ejemplo de la otra cara de la moneda son países como Yemen (el peor posicionado), Haití, Chad o Burkina Faso.

Tabla 1.1: Los diez países del mundo con mejor infraestructura de transporte

País	Ranking Mundial
Singapur	1
Holanda	2
Hong Kong	3
Japón	4
Corea del Sur	5
Suiza	6
Alemania	7
Emiratos Árabes Unidos	8
España	9
Francia	10

1.2.2. Contexto regional

En lo que respecta a Latinoamérica y el Caribe, relevamientos realizados por la FAO [6] detallan que los bosques ocupan un área de 935,5 millones de

ha, equivalente al 46,4 % de toda la superficie de la región. Los mismos brindan productos que contribuyen al desarrollo socioeconómico y colaboran con la protección del medio ambiente. La madera proveniente de los bosques es utilizada como insumo por la industria forestal, donde luego de ser procesada genera productos como el combustible de madera, carbón vegetal, madera en rollo, madera aserrada, pulpa para papel, papel, paneles de papel y paneles de madera entre otros. En dicha región se estima que el consumo anual per cápita de productos forestales comestibles es de 9,4 kg y el mismo depende del contexto socioeconómico de la población. El sector más vulnerable radica en zonas rurales con ingresos limitados. Por lo que la deforestación es un problema ambiental y socioeconómico.

Contemplando el período desde 1990 hasta 2010, se observa en la región que la deforestación se ha desacelerado, debido a la reducción en la tasa anual de pérdida de bosque en Brasil. Esta tendencia excluye el evento atípico ocurrido en 2019 cuando un incendio en la región Amazónica generó la pérdida de 1 millón de ha boscosas. Los países mas importantes en términos de superficie territorial con bosque, que cuentan con más de 1 millón de ha son: Brasil, Chile, Argentina, Perú y Uruguay. Brasil, Argentina y Uruguay no han incrementado las tasas de reforestación en el período desde 2010 al 2015.

En América Central, la demanda de madera en rollo cayó luego de la crisis financiera mundial en 2007 hasta el 2017; en ese mismo período la producción de madera aserrada se ha mantenido constante y la producción de pulpa de papel ha caído. Por otro lado la producción de paneles de madera se ha duplicado. Analizando ahora la región de América Latina, se observa que en el mismo período la producción de madera en rollo creció constantemente, al igual que la producción de madera aserrada; datos de la demanda de puplpa de papel indican que es el producto de mayor producción en ésta región. El comportamiento de la producción de paneles de madera en América Latina ha tenido un crecimiento de 302 %.

De acuerdo al estudio del Foro Mundial de Economía presentado en la [sección 1.2.1](#), en América Latina el mejor país con infraestructura de transporte es Chile mientras que en el Caribe es República Dominicana. La tabla 1.2 muestra algunos países de la región y su ranking en el estudio mencionado.

Tabla 1.2: Once países de la región con mejor infraestructura de transporte

País	Ranking Mundial
República Dominicana	37
Panamá	48
México	51
Chile	54
Ecuador	64
Argentina	78
Brasil	85
Costa Rica	88
Uruguay	90
Colombia	92
Honduras	95

1.2.3. Contexto Nacional

En lo que respecta a Uruguay, datos extraídos del sitio web de la Sociedad de Productores Forestales¹ muestran que en los últimos años el sector forestal ha crecido tanto en sus plantaciones como en su desarrollo industrial. En el año 1999 se contaba con 565.793 ha de superficie efectiva² forestada y para el año 2018, esta cifra aumentó a 1.000.190 ha, donde ésta representa el 6 % del total de la superficie del país. Uruguay dispone de un gran potencial para el desarrollo de nuevas plantaciones. Existen suelos en los que los árboles se desarrollan muy bien y la posibilidad de otro tipo de producciones es más limitada. En los últimos tres años el área cubierta por plantaciones se ha ido expandiendo a razón de unas 20 mil ha por año. Dichas plantaciones en su mayoría (más del 60 %) se realizan en predios de productores agropecuarios en integración con las demás producciones y en convenio con empresas forestales. De esa forma, los productores agregan un nuevo rubro de producción e ingresos a sus establecimientos y las empresas forestales disponen de materia prima para las industrias.

¹<http://www.spf.com.uy>, último acceso: 22 de Noviembre de 2020

²Superficie efectiva: las categorías de especie sin considerar las áreas de nuevas plantaciones ni de reforestaciones/rebrotes, que si bien son áreas efectivamente forestadas no se reconocen

En cuanto a la composición de las especies de la superficie forestada, el 27 % son *Eucalyptus grandis*, lo sigue un 22 % de *Eucalyptus dunnii* y un 21 % de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*. El eucalipto procede de Australia e incluye a más de 600 especies y los pinos son originarios del sudeste de Estados Unidos, donde los mismos se adaptan muy bien al clima nacional.

A su vez, el sector forestal en la actualidad representa el 3,6 % del PBI, donde participan en el entorno de 1.800 PYMES. De acuerdo a datos proporcionados por el BPS, el personal ocupado en el sector alcanza a más de 16.500 trabajadores. Esta cifra no incluye los empleos indirectos que genera el sector, que abarcan actividades de transporte y logística, así como servicios conexos. Se estima que en total el sector emplea a más de 25.000 trabajadores de forma directa e indirecta, siendo el 1,5 % del empleo total del país. Además las exportaciones alcanzaron los 2,2 mil millones de USD en 2019, en volumen esta cifra representa 18,5 millones de m³. Los principales productos que la componen pueden apreciarse en la figura 1.3. [7]

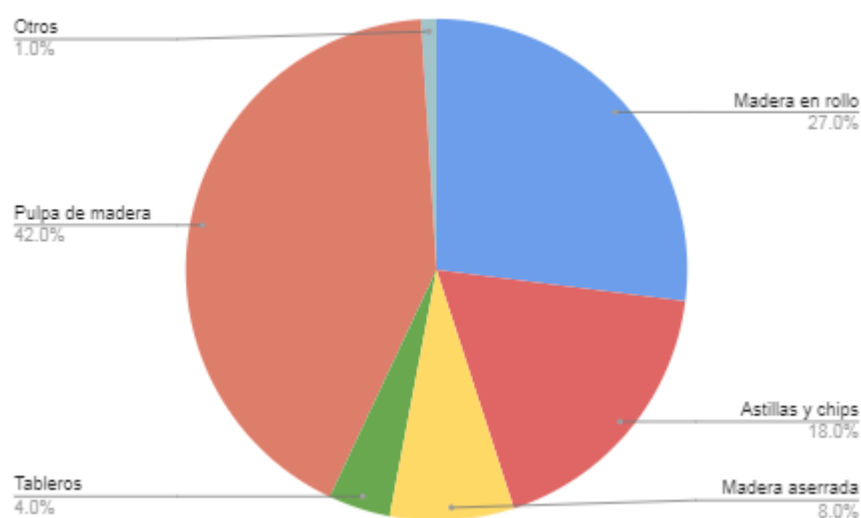


Figura 1.3: Producción de derivados madereros en Uruguay en el año 2019

Debido al desarrollo del sector forestal, el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT) elaboró una propuesta a la Sociedad de Productores Forestales (SOPROFO) que consistía en desarrollar Normas Nacionales sobre Gestión Forestal Sostenible, para que Uruguay pudiera integrarse al Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (PEFC). La participación en dicho programa habilita a la utilización del logo PEFC, el cual tiene recono-

cimiento internacional; la norma UNIT ISO 9001 - 2015 en la página 57 de su capítulo Introducción especifica que la certificación por el PEFC “garantiza que el producto forestal proviene de un bosque gestionado con criterios de sostenibilidad y certificado por un organismo reconocido”. De esta propuesta se generaron las normas 1151-2014, 1152-2014 y 1153-2006 [8]

En cuanto a la infraestructura Uruguay presenta una vasta y densa red vial, que tiene cerca de 8.776 km de los cuales 7.977 km están pavimentados, lo que arroja un ratio de 45 km de carreteras pavimentadas por cada 1.000 km² de superficie [9]. En el ranking de infraestructura de transporte, tomado como referencia para el mundo y la región, Uruguay ocupa el 5to puesto entre los países de América del Sur.

Capítulo 2

Antecedentes

Este capítulo se centra en las temáticas principales que rigen la naturaleza del problema atendido desde la perspectiva de la investigación de operaciones. A su vez se incluye la revisión de la literaria, la cual introduce los principales avances logrados a través de los años por investigadores que se enfocaron en desarrollar trabajos en la temática mencionada. Se basa fundamentalmente en la exposición de otros trabajos sobre el tema estudiado.

2.1. Investigación de operaciones

La investigación de operaciones se basa en la utilización de modelos matemáticos, estadísticos y algorítmicos, con el objetivo de realizar y dar apoyo a la toma de decisiones. Surge durante la segunda guerra mundial cuando se le encomienda a científicos del ejército Inglés obtener la mejor programación posible para la utilización de materiales bélicos. Una herramienta fundamental de la investigación de operaciones es el modelado matemático, el cual a través de una representación abstracta de la realidad pretende encontrar la solución óptima al problema planteado, con el objetivo de brindar un apoyo a la toma de decisiones.

Comúnmente se definen cinco fases o pasos para construir un modelo matemático:

- Identificación del problema
- Elección del tipo de modelo
- Formalización del modelo

- Implementación computacional
- Interpretación de resultados y validación del problema/realidad

Esta disciplina ha sido ampliamente aplicada en servicios públicos, ambientes de producción, transporte, construcción, servicios de salud entre otros. Su potencial abarcativo le permite ser un apoyo a la toma de decisiones, estratégicas y tácticas.

2.1.1. Problemas silvícolas

En lo que se refiere a la planificación forestal, los problemas silvícolas abordan tanto la perspectiva operacional en lo que refiere a la factibilidad de la cosecha para brindar un flujo de materias primas estable de manera de cumplir con la demanda (enfoque clásico), así como también la perspectiva medioambiental (aspecto que se agregó como consecuencia de la toma de conciencia del impacto ambiental de las actividades del área).

Como área de aplicación de la investigación operativa, los problemas silvícolas tienen como objetivo principal el rendimiento sostenido de los bosques, maximizando el valor residual de los mismos. En este contexto, se enmarcan decisiones sujetas a restricciones sobre la superficie cosechada, la cantidad de árboles a cosechar entre distintos tipos, el cumplimiento de la demanda, la contemplación del impacto ambiental, entre otros. Todo esto enmarcado en una planificación a largo plazo, ya que la cantidad de ciclos de crecimiento necesarios puede insumir una cantidad de años considerable. Por otro lado, la naturaleza de los problemas silvícolas incluyen decisiones operativas, las cuales son evaluadas en horizontes de planificación de corto plazo, como la asignación semanal de recursos. En resumen, se trata de decidir sobre qué actividades realizar y cuándo.

2.1.2. Problema del transporte

El problema del transporte consiste en el diseño de rutas de entrega con el objetivo de minimizar el costo total de abastecimiento a una serie de puntos de demanda desde un conjunto de puntos de oferta, con un horizonte de planificación de largo o mediano plazo. El mismo es muy estudiado por investigadores de operaciones debido al impacto en los costos que generaría una optimización

en las rutas de entrega. Se considera que “los costos de transporte son un 50 % de los costos logísticos” [10].

Los primeros antecedentes de la aplicación de métodos relacionados con la programación lineal para la resolución de este tipo de problemas datan de la década de 1950. Se encuentran particularmente en los trabajos de Dantzig (1950) y de Lasala (1955). Desde entonces se utiliza el método simplex (desarrollado por el propio Dantzig en 1947) o una variante de este aplicada específicamente a problemas de transporte con características específicas llamada técnica de transporte.

Darle tratamiento a los temas vinculados al problema de transporte en la industria forestal es un tema complejo ya que vincula decisiones estratégicas (como por ejemplo seleccionar cuál o cuáles rutas construir) y tácticas (englobadas en la órbita del problema de ruteos de vehículos, una variante del problema de transporte con un horizonte de planificación menor). Además se deben considerar cuestiones ambientales, mientras que se busca minimizar costos relacionados a la construcción, uso y mantenimiento de carreteras. Estos objetivos suelen estar en conflicto por su naturaleza interrelacionada.

2.2. Revisión literaria

En este trabajo se presenta un tipo de problema que integra a las dos disciplinas que tratan las secciones [2.1.1 Problemas silvícolas](#) y [2.1.2 Problema de Transporte](#). Por este motivo, la solución diseñada requerirá planificación a largo plazo, la cual debe determinar qué actividades y cuándo desarrollarlas, así como la correcta programación de la accesibilidad a los bosques incluyendo la creación o reacondicionamiento de carreteras que permitan minimizar el costo de transporte o la distancia recorrida; lo que insume altos costos y varios años. Por último se busca garantizar un flujo continuo y controlado de madera.

En cuanto al horizonte de planificación de este trabajo, el mismo depende a qué tópico de los presentados se refiere. El horizonte para los problemas de transporte, es en el entorno de varios ciclos de crecimiento (entorno de 30 o 40 años); esto se debe a las actividades de construcción de carreteras y a que la

tasa de descuento para este periodo reduce los ingresos y los costos de manera significativa. En cuanto al horizonte para los problemas silvícolas, el mismo se extiende de 60 a 200 años; esto es para asegurar la productividad perpetua de los bosques y su sostenibilidad en el tiempo.

El camino recorrido para dar tratamiento a este tipo de problemas tiene su base en el trabajo de Weintraub y Navon[11], que data del año 1976. Previamente a esto los problemas silvícolas y de transporte eran tratados por separado.

La presente sección busca ser un resumen de las publicaciones seleccionadas por el equipo de trabajo de este proyecto, desde el ya mencionado hasta algunos de los realizados en nuestros días, para dar una idea al lector un contexto del estado del arte en el área de estudio. Previamente al detalle de dicha revisión se describen los criterios utilizados para el relevamiento realizado.

2.2.1. Criterios de relevamiento

La literatura recomendada por el tutor del Proyecto, incluyó tres artículos académicos: el ya mencionado artículo de Weintraub y Navon [11] y los trabajos de Andalaft et al. [12] y de Flisberg et al. [13]. Los mismos sirvieron como primer acercamiento a la temática del trabajo a realizar y fueron complementados para generar un marco de referencia más robusto, que sirviese de guía para este proyecto.

Para llevar adelante la revisión de dicha bibliografía complementaria, se diseñó un método que permitiese jerarquizar la información. Esto se logró estableciendo criterios sobre la búsqueda realizada con el motor del portal Timbó¹, los mismos se pueden resumir de la siguiente manera:

- Se realizaron tres búsquedas específicas en el buscador del portal a partir de palabras clave extraídas tanto de la consigna de este proyecto como de la literatura afín recomendada. Dichas búsquedas fueron combinaciones de las siguientes palabras clave: silvicultura, cosecha forestal, planificación forestal, diseño de redes, optimización, programación entera-mixta.

¹<https://foco.timbo.org.uy/home>

- Se ejecutó una primer clasificación, tomando como base los títulos de los trabajos encontrados en cada búsqueda. Esto eliminó un alto porcentaje de los resultados obtenidos.
- Con aquellos resultados que superaron el filtro del punto anterior, se realizó una lectura de los resúmenes de cada uno. Este punto representó una nueva instancia de descarte.
- Finalmente, como último filtro para definir los trabajos que serían integrados a este documento, se estudió el contenido de los mismos en busca de qué podrían ofrecer como mejora o adición a los trabajos anteriores.

2.2.2. Reseña de la literatura utilizada

A continuación, se presenta un detalle de los aspectos más destacados de la revisión literaria realizada. Los primeros tres trabajos investigados fueron los recomendados por el supervisor, el artículo pionero de Weintraub y Navon [11] es un hito en el área, ya que tuvo como objetivo sintetizar los trabajos realizados sobre los temas de los problemas silvícolas y de transporte.

Como se dijo, hasta la fecha de publicación del mismo, los trabajos relacionados habían atendido a estos como problemas separados. Por ende, los autores sientan las bases para el tratamiento integrado del problema de la planificación de una cosecha forestal, en el cual se busca asegurar un flujo perpetuo de madera dado una cantidad de plantíos y con un horizonte de planificación de largo plazo. El problema planteado en el artículo abarca cuestiones relativas al manejo de la madera, la construcción y el mantenimiento de caminos para transportar troncos.

El bosque que se tomará en cuenta en la planificación se divide en zonas de acceso, las mismas se definen como una superficie la cual es posible gestionar desde un punto de acceso. A su vez; se considera que existen varios tipos de árboles, los cuales se deben cosechar. Hay que tener en claro que cada tipo puede estar presente en más de una zona y para el modelo, el mismo tipo de árbol en dos zonas diferentes, implica dos clases diferentes (esta es precisamente la definición de “Clase”). De esta forma, se nombra a la clase a partir del

tipo de madera y de la zona de acceso. Por ejemplo: E11-1 describe que el tipo de madera es 11 y la zona de acceso 1. Cuando la madera está en el rango de más de una zona de acceso, se especifican todas. A modo de ejemplo si la zona E11 tiene accesos la zona 1 y 2 se denominaría como E11 - 12. Es importante aclarar que por razones prácticas, en ciertas oportunidades y hablando dentro de un mismo tipo de madera, se habla de clase y zona de acceso como términos equivalentes. Sin embargo, a los efectos del modelado, la clase concuerda con la definición presentada en este párrafo.

Se propone representar mediante una red que incluye nodos y arcos, los caminos existentes y los potenciales, por los que se accede a las distintas zonas, así como también se transporta personal, equipamiento y madera. La red representada en el modelo tiene dos tipos de nodos; los de acceso al mercado fuera de la zona forestal, que es donde se va acopiar la madera y los de acceso al bosque que es donde se produce.

Es requisito seleccionar rutas potenciales para el modelo. Para ello, no es razonable que sean todas las rutas posibles, debido a que este número aumenta de forma exponencial con el número de nodos y arcos, pudiendo llevar la complejidad del problema a un nivel inmanejable.

Por lo tanto, se restringen por los siguientes criterios:

- Minimizar el costo de transporte.
- Minimizar costo de construcción y mantenimiento de las carreteras.
- Sentido común (referido al conocimiento real del terreno boscoso).

El modelo permite contemplar restricciones como lo son:

- Capacidad por segmento de ruta, que es la cantidad de vehículos que pueden circular por unidad de tiempo.
- Capacidades de transporte, se puede referir al volumen que pueden transportar los vehículos así como la cantidad de los mismos disponibles.
- Capital disponible.
- Cantidad de madera cosechada o a cosechar, etc.

Tomando en cuenta todos los aspectos mencionados, se crea un modelo de programación lineal de enteros mixtos cuya función objetivo es maximizar los

ingresos con descuento de la venta de madera neta y los costos generados. La principal complejidad del modelo surge de la necesidad de obtener acceso a un área antes de poder gestionarla.

Siguiendo con las recomendaciones brindadas en la consigna de este proyecto, en Andalaft et al.[12] se trabaja sobre un caso de estudio real de una empresa privada chilena que administra varias plantaciones de pinos. Comparándolo con el trabajo anterior, este artículo añade la consideración de conceptos que aumentan la complejidad del problema tratado y, por lo tanto, aproximan mejor el modelo a la realidad. Las nociones de adyacencia (parcelas vecinas entre sí), estacionalidad (tomar en cuenta los efectos de la estación del año), composición material de las carreteras (tierra, grava), calidad de la madera y acopio de la misma están presentes en el documento que trata esta sección; sin embargo, estos conceptos no fueron introducidos en el modelo. La adyacencia es un requisito que surge del problema que se transforma en una restricción en el modelo y refiere a que no se pueden cosechar parcelas que están adyacentes entre sí en un mismo período de tiempo; en cuanto a la estacionalidad se refiere a las incidencias climáticas que puedan afectar las tareas de cosecha según en las estaciones del año. Los principales aportes que esta investigación realizó al problema de la planificación de la cosecha fueron el uso efectivo de técnicas de resolución de un problema de programación entero-mixto como el levantamiento (lifting) de restricciones relacionadas con la construcción de carreteras y el de la relajación Lagrangeana para descomponer el problema en componentes más simples.

El modelo desarrollado en este trabajo es de programación lineal entera-mixta en el que se utiliza la mencionada relajación Lagrangeana y el fortalecimiento de la formulación con el objetivo de obtener una solución óptima; a su vez contempla las decisiones a tomar en cada período como lo son: rodales a cosechar, cantidad de producción de madera, caminos a construir y tipo, cantidad de madera transportada y almacenada y la elección de la maquinaria a utilizar.

En cuanto a las restricciones, se introduce una que a priori hace el problema más complejo, la restricción de adyacencia. La misma impide que se cosechen unidades adyacentes en un mismo periodo ya que afectan de manera

negativa al medio ambiente. Para atacar este problema se proponen distintas alternativas, estas son: programación lineal con generación de columnas, donde se generan nuevos patrones de cosecha mejorados que satisfacen la adyacencia en los subproblemas; búsqueda tabú, recorrido simulado, y simulación por montecarlo.

Dado que la relajación del problema de programación lineal es débil, para obtener soluciones óptimas al problema en cuestión, se plantea el fortalecimiento del modelo, el levantamiento de restricciones y prioridades especiales para la ramificación.

Para el fortalecimiento del modelo, se trabaja en cada restricción de carga fija o activación ajustando los valores de cota inferior (valor 0) y superior (valor M , lo suficientemente grande) que pueden tomar las variables continuas. Dichas cotas se estiman a partir de los datos del problema y se representan en las restricciones que vinculan estas variables con variables binarias, las cuales “activan” los costos fijos en la función objetivo. Este concepto de fortalecimiento se utiliza específicamente en las restricciones de tipo de carga fija reduciendo las capacidades de las carreteras.

Se plantea también realizar restricciones lógicas, la idea es agregar información “oculta” de modo de facilitar la búsqueda de una solución óptima. Para el problema en cuestión, las capacidades de las carreteras son mucho más grandes que los flujos reales que van a haber, por lo que las restricciones pueden acotarse superiormente por valores más “realistas” en este sentido. Además se introducen nuevas desigualdades relacionadas de manera de eliminar soluciones ineficientes, es el caso por ejemplo de la eliminación de instalaciones abiertas no utilizadas y la eliminación de enlaces aislados en el diseño de la red.

En cuanto al levantamiento de restricciones la misma se realiza agregando términos positivos a los lados izquierdos de estas sin cambiar sus lados derechos, manteniendo la validez de las restricciones.

La introducción de los conceptos mencionados anteriormente generan que la búsqueda de una solución óptima sea compleja. La relajación Lagrangeana no solo genera subproblemas más fáciles de resolver, sino que crea cotas más fuertes de la función objetivo.

Finalizando con los artículos recomendados, en Flisberg et al. [13], trabajo realizado para la empresa sueca Sveaskog, se presenta un estado de situación donde las particularidades climáticas del país juegan un rol central en el modelado de la realidad a tratar. Estas se traducen en caminos inaccesibles en ciertas épocas del año, generando un desafío adicional al clásico problema de planificación de la cosecha forestal.

En lo que respecta a los detalles del trabajo, la empresa cuenta con más de 6000 zonas de cosecha, y se proyecta en un horizonte de 5 años. Se utiliza un enfoque integrado que busca maximizar el valor de los bosques utilizados al finalizar el horizonte de planificación mientras minimiza los costos logísticos. Este estudio hace un fuerte hincapié en el ingreso de transporte a las áreas de cosecha. El mismo está restringido según las condiciones del suelo, las cuales dependen de la época del año y de las precipitaciones. Los periodos comprometedores de los que se habla son la primavera (cuando ocurre el deshielo) y el otoño (periodo de fuertes lluvias).

Del enfoque descrito, motivado por las particularidades del caso de estudio, derivan los principales aportes del trabajo al problema general. Se integran grandes cantidades de información a través del uso del sistema Heureka (que reúne datos sobre rendimientos y estado de los bosques) y la NVDB (base de datos oficial de las carreteras suecas).

A partir de lo descrito anteriormente, el artículo propone tres aportes básicos que se centran en diferentes aspectos. En primer lugar, un nuevo modelo de optimización que integra la cosecha y planificación logística donde el mejoramiento de caminos es un aspecto clave. En segundo lugar, la realización de un análisis comparativo entre atender los temas (selección de cosecha y logístico) por separado como se realiza típicamente o hacerlo integradamente mediante el modelo desarrollado. Este análisis arroja que el tratamiento integral tiene ventajas en términos de costes logísticos y valor forestal. En tercer lugar, el establecimiento de un método de resolución que permita establecer soluciones de alta calidad para el nuevo modelo de optimización, basándose en una agregación secuencial que descompone el modelo en varios problemas de menor tamaño.

Para integrar las características mencionadas del caso de estudio, el modelo de optimización utiliza una descripción detallada de las zonas de recolección, incluyendo: su ubicación espacial, el volumen de salida de los diferentes cálculos de surtido y el valor actual neto (VAN) por cada año en el horizonte de planificación. A su vez, cuenta con varias características nuevas como inventario entre temporadas, valor detallado y cálculos de distancia, flexibilidad en la utilización de diferentes sistemas y capacidad de cosecha. Como se mencionó previamente, también se hace uso directo de la información detallada del sistema Heureka y la NVDB, que posee información acerca del largo, condición de accesibilidad, máxima velocidad permitida, ancho de la carretera, calidad de la carretera y clasificación funcional; datos que serán de relevancia a la hora de calcular las distancias óptimas de transporte.

Todo lo expuesto genera que dicho modelo cuente con un alto grado de dificultad. Motivación principal para aplicar soluciones a partir del uso de la agregación secuencial. Entrando en una visión más detallada del modelo, destacan como novedosas frente a la literatura previamente tratada:

- La división de carreteras en cuatro tipos: Camiones y automóviles todas las estaciones; Camiones todas las estaciones excepto durante el deshielo, autos todas las estaciones; Camiones todas las estaciones excepto durante los períodos de deshielo y fuertes lluvias, automóviles en todas las estaciones excepto durante el deshielo; Camiones solo durante la temporada de invierno, coches solo en buenas condiciones climáticas.
- La categorización de la producción de madera en cinco surtidos básicos (de pino, de abeto, de pulpa de pino, de pulpa de abeto y de pulpa de abedul).
- La separación de las áreas de cosecha en clases numeradas, que van desde 1 (se puede cosechar todo el año) hasta 5 (solo puede cosecharse en invierno, con suelo congelado).
- Inclusión de varios tipos de camiones, con posibles usos diferente para diferentes combinaciones de temporada y tipo de carretera.

El resto de las características del modelo pueden entenderse como mejoras (o modificaciones) de uno anterior. [14]

- Las variables de flujo incluyen tipo de operación, tipo de camión y temporada
- Hay variables de inventario incluidas para equilibrar el mismo entre estaciones
- Las rutas están definidas para industrias y no para nodos de paso en el bosque
- Existen limitaciones en la capacidad de transporte y restricciones de cosecha.
- Uso de períodos comerciales y de anticipación en el modelo.

Además de los trabajos ya mencionados, existen otros que se destacaron en el relevamiento realizado aportando al equipo de trabajo aspectos o ideas novedosas para el tratamiento del problema de la planificación de la cosecha forestal en general.

En Troncoso et al. [15], trabajo realizado sobre la situación real de una empresa chilena, se encuentra una visión que hace especial hincapié en tomar en cuenta la demanda como motor que impulse la planificación. Las cadenas de valor, en lo que respecta a los procesos de demanda de madera, son cadenas de grandes dimensiones. En particular, dos de sus eslabones principales son la explotación de bosques (planificación forestal) y el procesamiento de madera en las fábricas (planificación industrial). En la mayoría de los enfoques utilizados por las empresas, los eslabones mencionados están desacoplados. Este artículo pretende mostrar una óptica integradora de la planificación basada en la demanda para dejar al descubierto los impactos en la mencionada cadena de valor. Para ello plantea un modelo de programación entera-mixta (MIP) con una estrategia integrada. En el enfoque integrado, todas las partes de la cadena de valor (bosques, transporte y fábricas) son impulsadas por la demanda del producto final y el objetivo es maximizar el beneficio de la empresa (VAN de toda la cadena de valor).

Las ineficiencias de tener una cadena desacoplada radican en que se llega a una suboptimización: en lo que respecta a las fábricas no pueden optimizar sus beneficios porque necesitan adaptar los procesos de producción de acuerdo a la disponibilidad de madera presente en el mercado y por el lado de los

planificadores forestales no pueden maximizar sus ganancias ya que no tienen en cuenta las demandas finales de mercado. El horizonte de planificación para este modelo es para un ciclo de rotación de los bosques, en el entorno de los 25 años.

Las plantaciones de bosques se dividen en un conjunto de áreas. Las decisiones de este modelo son: que áreas cosechar y cuándo, que patrón de corte usar cuando se cosecha el área, flujos de madera entre unidades de cosecha y las fábricas y entre fábricas, producción de madera en las mismas y flujos hacia clientes finales. Según los resultados, el VAN puede aumentar hasta un 5.0 % cuando se implementa la estrategia integrada propuesta en comparación con una estrategia desacoplada.

Otros aportes de interés al problema de la cosecha forestal se encuentra en la órbita de un área incluida en esta: la planificación operativa. En el trabajo realizado por dos Santos et al. [16], allí se introduce un enfoque diferente en cómo se dimensiona temporalmente el problema, atendiendo la planificación diaria y semanal de las actividades de cosecha forestal utilizando un caso de estudio en el sur de Brasil, esto es: a su planificación operativa. La planificación operativa se ocupa de la toma de decisiones a corto plazo (planes diarios y semanales), abordando las decisiones relacionadas con la cosecha, carga y distribución de troncos, el transporte de productos cosechados desde el bosque a los clientes, y la asignación de maquinaria necesaria para realizar estas tareas. Además, es importante tener en cuenta que los procesos de optimización en este nivel deberían ofrecer soluciones en un corto tiempo de cómputo.

Se presenta por lo tanto, un modelo de optimización novedoso para el cronograma diario de frentes de aprovechamiento forestal en rodales forestales, con el fin de satisfacer la demanda diaria de diferentes productos en los centros de demanda, teniendo en cuenta los costos de transporte. El objetivo es minimizar el costo total de las operaciones de cosecha, incluido el costo operativo de la cosecha, dependiendo de las características topográficas y estructurales de los rodales y el costo de movimiento, es decir, el costo relacionado con el traslado de la maquinaria entre los rodales forestales así como también el costo relacionado con el transporte de madera desde los rodales a los centros de demanda.

Finalmente se concluye en el estudio que los costos de transporte dominan el costo total de las operaciones. El modelo propuesto es apropiado y puede aplicarse efectivamente para optimizar la planificación operativa de las actividades de cosecha. Sin embargo, las instancias de gran tamaño pueden conducir a un aumento sustancial en la complejidad y la carga computacional.

En el área de interés del párrafo anterior, Moura et al.[17] presenta una planificación a nivel operativo, de duración diaria, en el período de un año.

El problema particular que aborda este trabajo también se sitúa en plantaciones forestales brasileñas. Allí, la producción potencial sostenible de dichas plantaciones se estima en alrededor de 390 millones de $\text{m}^3/\text{año}$. El principal segmento de consumo son las industrias de pulpa y papel, seguidas por las industrias de arrabio y acero. En 2006, el área plantada generó un ingreso bruto de aproximadamente USD 4 mil millones, y el valor del producto bruto de toda la cadena de transformación de madera industrial excedió los USD 36 mil millones.

En este contexto, el plan de cosecha debe determinar, para cada día, en qué área debe trabajar un equipo de cosecha y el volumen promedio de madera que debe cosechar. Además, el plan de transporte debe establecer, para cada día, el volumen promedio de madera que debe transportarse desde cada área a una unidad de procesamiento. A su vez, para cumplir con el abastecimiento diario a las unidades de procesamiento de madera, la misma puede ser obtenida de plantaciones propias o comprada a terceros. Los mencionados planes deben elaborarse de acuerdo con el contexto operativo y las limitaciones e hipótesis que se plantean en el problema.

Resulta novedoso la utilización de estrategias híbridas para la resolución de este problema, basadas en principios de la metaheurística GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), en métodos de recombinación típicamente utilizados con algoritmos genéticos, búsquedas dispersas y en modelos lineales matemáticos. Primero, se utiliza una heurística GRASP para crear un conjunto de soluciones de élite, es decir, buenos planes de cosecha y transporte. A continuación, en una segunda fase, se genera un modelo lineal relajado para cada solución en el grupo. Estos modelos lineales se resuelven, y las soluciones

relajadas así obtenidas se utilizan para producir nuevos planes de transporte válidos.

Se utilizaron diferentes estrategias para mejorar los procedimientos GRASP estándar, como la construcción basada en la memoria, la vinculación de ruta y la recombinación de la solución seguida de búsqueda local. Las estrategias híbridas demostraron ser robustas y capaces de obtener soluciones de alta calidad en poco tiempo. También fueron más eficientes que las estrategias basadas únicamente en GRASP.

Siguiendo en el entorno de la planificación operativa, el trabajo de Lessa et al. [18], incluye la noción de compromiso entre consideraciones económicas y ambientales, procurando aumentar la eficiencia y mitigar los daños con la aperturas de cubiertas forestales.

En el modelo planteado se incluyen relaciones espaciales en cuanto a la planificación de la cosecha, que se logran a través de restricciones de adyacencia. Para resolver este tipo de problema, los principales enfoques utilizados son el enfoque URM (Modelo de restricción de unidad) y el enfoque ARM (Modelo de restricción de área).

El enfoque URM evita que las parcelas adyacentes se cosechen en el mismo año del horizonte de planificación, independientemente de su área. El enfoque ARM tiene en cuenta el área de las parcelas, permitiendo que las parcelas contiguas se cosechen en el mismo año del horizonte de planificación, siempre que el área del bloque formado no exceda el área de corte superficial máxima determinada.

Con los resultados obtenidos luego de correr el modelo, se concluye que los enfoques ARM y URM son alternativas viables para hacer frente a los problemas de programación de la cosecha forestal, y para el área en cuestión el enfoque ARM es el más apropiado, debido a la posibilidad de obtener mayores rendimientos económicos, respetando las áreas límite de cosecha.

La preocupación por las consideraciones ambientales evidentemente aplica también al problema de la planificación de la cosecha forestal en su formula-

ción clásica (con horizontes temporales de mediano y largo plazo). El trabajo realizado por Kašpar et al. [19] aborda este tópico. Esto se realiza mediante un modelo de programación entera de manera de obtener un óptimo aprovechamiento forestal respecto a los requisitos económicos y ambientales.

La importancia de contemplar los aspectos de los ecosistemas de los bosques como la biodiversidad, radica en cómo afecta la vida de muchas especies de aves y mamíferos. Estos pueden beneficiarse de la homogeneidad espacial de los bosques ya que muchas especies necesitan bosques jóvenes para anidar y otros viejos para la migración. El principal aspecto que influye en los ecosistemas es el efecto de borde. El efecto de borde es donde dos ecosistemas se unen, estos pueden ser creados por actividades humanas como cortes para crear una zona de amortiguación alrededor de un área central. La idea principal es minimizar el efecto de borde creando el perímetro exterior más pequeño del área de reserva en comparación con el área total.

La naturaleza de los objetivos de este modelo (minimizar impacto ambiental y maximizar los volúmenes de cosecha) los hace mutuamente contradictorios. Para atacar este problema se planteó establecer distintos pesos para cada función objetivo, para ello es necesario antes determinar la importancia de cada una.

El objetivo de este modelo es identificar un programa de cosecha en el que se pueda maximizar la cantidad de madera mientras un área de reserva de madera madura permanece intacta con una cantidad mínima disponible. Además, la forma de las áreas de reserva de madera madura son importantes debido al efecto de borde mencionado anteriormente. El problema se describe con tres funciones objetivo: maximizar la cantidad cosechada, minimizar el perímetro del área de reserva sobremadurada y minimizar la cantidad de madera disponible en áreas de reserva de madera madura.

El modelo presentado está diseñado sin especificaciones de especies de vida silvestre y el administrador puede elegir el área de reserva de madera madura requerida de acuerdo con una situación particular.

Para finalizar la revisión literaria de este trabajo, no se puede dejar de des-

tacar lo publicado en los artículos de Naderializadeh y Crowe [20], que miden el impacto de la densidad del conjunto de caminos en los resultados obtenidos; y de Sarrazin et al. [21], que plantea la inclusión de un centro logístico en la red del problema.

En el primero de los mencionados, se examina una oportunidad para mejorar la utilidad de un modelo en el cual la función objetivo es maximizar los ingresos por cosecha menos los costos de construir carreteras y transportar madera cosechada; al cual se le llama “modelo integrado”. La oportunidad para esta mejora se debe a la capacidad relativamente reciente de generar, computacionalmente, un gran conjunto de caminos candidatos operacionalmente viables y usar este conjunto dentro de instancias problemáticas. Lo novedoso de este trabajo es que logra cuantificar y evaluar los beneficios de usar un conjunto denso versus un conjunto escaso de caminos candidatos, generados usando un modelo de ubicación de camino óptimo, dentro del modelo de planificación táctica integrada. Para lograr este objetivo, se resuelve una nueva formulación del mismo, utilizando el algoritmo de ramificación y acotamiento, para tres casos de problemas diferentes en los que se utiliza un conjunto de carreteras candidato denso frente a un conjunto escaso, y se comparan las soluciones resultantes. La principal contribución de este documento es una ilustración del valor económico potencial de generar y usar un conjunto denso versus un conjunto escaso de caminos candidatos para lograr reducciones en los dos mayores costos resultantes de la planificación táctica.

Los resultados del estudio muestran que el uso de un conjunto denso versus un conjunto escaso de carreteras candidatas, para las tres instancias problemáticas, arrojó soluciones con una disminución media en los costos de transporte y construcción de 34,34 % y 6,94 %, respectivamente. El aumento promedio en los ingresos fue de 1,06 %, y el aumento promedio en el valor de la función objetivo (ingresos menos los costos totales de construcción de carreteras y transporte) fue de 5,62 %. Además, el mapeo de las soluciones revela los atributos espaciales de una red de carreteras de menor costo frente a una de mayor costo: carreteras más rectas y bifurcaciones ubicadas más eficientemente dentro de la red de carreteras.

El segundo trabajo mencionado en el párrafo anterior se sitúa en el contexto

de los desafíos que enfrenta la industria forestal norteamericana, en particular la crisis de vivienda de 2008-2009 y el declive del sector de la pulpa y el papel. En dicho marco, donde la demanda de algunos sectores se recuperó, pero en otros la disminución continúa, se vuelve esencial lograr maximizar el valor de los bosques naturales mixtos. La razón es que los troncos cosechados en estas áreas tienen una gran variedad de valores y son transformados por fábricas con capacidades de procesamiento muy diferentes. A su vez, los sitios de cosecha pueden estar a una gran distancia de la planta y distribuirse en diferentes áreas.

Para el tratamiento de la problemática mencionada en el párrafo anterior, se introduce en la red que forman los diferentes bosques, fábricas y caminos, la figura del centro logístico para el sector forestal, partiendo de la hipótesis de que estos podrían ayudar a asignar eficientemente la fibra de madera a los usuarios correctos al tiempo que reducen los costos de clasificación y transporte.

En lo que respecta a la definición formal de centro logístico, en el artículo se simplifican las actividades a realizar dentro de este, estableciéndose como el uso simultáneo de patios específicos de clasificación de troncos y coordinación de transporte.

La introducción de un centro logístico en una red forestal no es una novedad en sí misma. Ya se habían explorado algunos beneficios de llevarla a cabo, por ejemplo Sessions et al. [22] en el año 2005 logró exponer que los bajos errores de clasificación que proporcionan son una razón fundamental del éxito de su implementación. Así mismo Chan et al., en 2009, indicó lo propio para el acceso a configuraciones específicas de camiones [23]. Sin embargo, no existía hasta este trabajo un consenso sobre la rentabilidad de tales estructuras o una clara indicación de los factores clave que definieran sus beneficios. Además, la interacción entre los centros de logística forestal y su entorno empresarial no solía estudiarse para una red compleja. El principal aporte de este trabajo fue lograr un enfoque que tomara en cuenta estas carencias y las corrigiera.

En lo que respecta a los resultados, estos muestran que un centro logístico que ya está en funcionamiento agrega USD 0,52 en ganancias por cada metro

cúbico de madera disponible para la cosecha para la red en estudio (que cuenta con más de 2.580.411 m³ por año, USD 1,4 millones anuales). Un análisis de sensibilidad también destaca que los precios más altos y las tasas de error de clasificación, tienen el mayor impacto en la rentabilidad del centro logístico.

Capítulo 3

Descripción del problema

Este capítulo se enmarca en la comprensión del problema de la planificación de la cosecha forestal que se va a abordar en el presente trabajo. Este problema es establecido en base a diferentes revisiones literarias estudiadas donde se combinan diferentes tipos de problemas, depurando aspectos que no se consideraban necesarios.

Se considera un problema de planificación de la cosecha forestal en el que se requiere minimizar los costos de ésta mientras se atiende la demanda de madera durante cierto horizonte temporal discreto. Los costos dependen de la tala de los árboles, del transporte de la madera asociada a la tala, del almacenamiento de la misma y de la ampliación de la caminería existente, en caso de ser necesario. Para su manejo, los árboles se agrupan geográficamente en parcelas, sobre las que se puede decidir si se cosechan en su totalidad. A las parcelas se accede a través de una red de caminos. La red está conformada por nodos y caminos que los conectan de a pares. No todos los pares de nodos están conectados por caminos, en caso necesario se pueden crear nuevos caminos entre pares de nodos, existiendo un presupuesto disponible por período destinado a dicha actividad. Para cada parcela se conoce desde qué nodo se accede. La demanda de madera se establece sobre un subconjunto de los nodos, a su vez, existe un máximo de madera permitida a cosechar por período. Además, debido a requerimientos ambientales hay limitaciones temporales en la cosecha de parcelas contiguas.

3.1. Problema de la planificación de la cosecha forestal

La dinámica temporal del problema se representa según períodos en un horizonte de tiempo discreto. El problema abarca un plantío que consiste de un único tipo de árbol cuya cosecha da un único tipo de madera. De la madera a cosechar se conoce su demanda (medida en m^3) para cada período. La geografía del plantío está compuesta de áreas contiguas denominadas parcelas. De cada parcela se conoce su superficie plantada (medida en ha), su rendimiento de producción de madera (medido en m^3/ha) según el período de cosecha, y cuales son sus parcelas contiguas. Para cada parcela se puede decidir, por única vez en el horizonte temporal, si se la cosecha en su totalidad en un período dado. Además, por restricción ambiental no se puede cosechar parcelas contiguas en el mismo período.

A las parcelas se accede mediante caminería representada por una red de nodos y arcos dirigidos. Los nodos se categorizan según: origen de la madera a cosechar, intersección de caminos y salida de la madera del plantío. Para cada nodo origen se conoce qué parcelas son adyacentes al mismo, es a través de estos que la madera cosechada se transporta hacia los nodos de salida. Además, para cada nodo origen se tiene un costo unitario de procesamiento de la madera (medido en $\$/m^3$), donde la misma se extrae desde sus parcelas contiguas hacia la red. La demanda de la madera es atendida por el agregado del flujo de madera en los nodos de salida según período. Los arcos de la red se definen por un par de nodos, estos tienen un costo unitario de transporte asociado (medido en $\$/m^3$) y una capacidad de flujo (medida en m^3) según período. Además, los arcos se categorizan en existentes o potenciales a construir. Los arcos potenciales a construir tienen un costo de construcción asociado (medido en $\$$) según período. Estos arcos se pueden construir una única vez en todo el horizonte de planificación. Para determinar el valor presente de los costos se dispone de un factor de descuento.

El problema busca minimizar el valor actual neto de los costos incurridos en la cosecha, el procesamiento, el transporte y la actualización de la caminería mientras se cumplen los requisitos y se determina qué parcelas cosechar y qué arcos potenciales de caminería construir.

3.2. Modelado algebraico

A partir del desafío de garantizar un flujo de madera controlado y perpetuo, tema complejo en la gestión forestal, el cual requiere una planificación con un horizonte a largo plazo, se generó un modelo matemático que permite integrar a los problemas silvícola y de transporte planteados en la descripción del problema.

El objetivo principal de este trabajo es generar un modelo que minimice los costos asociados a la gestión forestal, mientras que al mismo tiempo, cumple con las restricciones existentes del problema. La [sección 3.2.1](#) presenta estos costos y otros aspectos del modelo de forma más detallada.

3.2.1. Descripción del modelo

El problema se representa mediante un modelo matemático el cual a partir de los parámetros de entrada, brinda como salida una configuración de las variables de decisión para proveer la solución óptima (en caso de poder ser resuelto en tiempos computacionales acordes). La solución óptima es aquella que minimiza la función objetivo; la misma trata de una función de costos sujeta a las restricciones. Las principales entidades del modelo son:

1. Conjuntos: los cuales representan periodos, la red de carreteras y parcelas que pueden ser cosechadas.
2. Parámetros: que sirven para representar la configuración de un sistema, como lo son por ejemplo: demanda por periodo, costos, etc.
3. Variables de decisión: las mismas se utilizan para decidir qué parcela cosechar, flujos por arcos, si construir o no un arco, cuánta madera almacenar por período y cómo se distribuye la demanda según los nodos de salida.
4. Restricciones: se utilizan para representar la región factible donde habita la solución óptima o en otras palabras, definen relaciones entre variables de decisión y parámetros.
5. Función objetivo: la misma representa el objetivo buscado en la resolución del modelo, en este caso particular se utiliza para minimizar los costos asociados a la cosecha.

3.2.2. Conjuntos

T = Períodos $t \in \{1, \dots, n\}$

N = Nodos en la red de transporte

N^0 = Nodos origen de la cosecha de madera / $N^0 \subset N$

N^i = Nodos intersección en la red de transporte / $N^i \subset N$

N^s = Nodos de salida de la madera del plantío / $N^s \subset N$

Notar que N^0 , N^i y N^s forman una partición de N

P = Parcelas

P_i^a = Parcelas adyacentes al nodo origen / $\bigcup_{i \in N^0} P_i^a = P$

P_p^c = Parcelas contiguas a la parcela p

A = Conjunto de arcos dirigidos desde i a j se representado como $(i, j) \in A$ con $i, j \in N, i \neq j$

A^e = Arcos existentes $(i, j) \in A^e$ / $A^e \subset A$

A^p = Arcos potenciales a construir $(i, j) \in A^p$ / $A^p \subset A$

3.2.3. Parámetros

d_t = Demanda de madera en el período t (en m^3) / $t \in T$ y $d_t \geq 0$

o_t = Cantidad máxima de madera que se puede cosechar en el período t (en m^3) / $t \in T$, $o_t \geq 0$

s_p = Superficie plantada de la parcela p (en ha) / $p \in P$ y $s_p \geq 0$

r_{pt} = Rendimiento de la parcela p , en el período t (en m^3/ha) / $p \in P$, $t \in T$, $r_{pt} \geq 0$

c_i = Costo unitario de procesamiento de madera en cada nodo origen (en $\$/m^3$) / $i \in N^0$, $c_i \geq 0$

a_{ij} = Costo unitario de transporte de madera asociado al arco (i, j) (en $\$/m^3$) / $(i, j) \in A$, $a_{ij} \geq 0$

u_{ijt} = Capacidad (en m^3) del arco (i, j) en el periodo t / $(i, j) \in A$, $t \in T$, $u_{ijt} \geq 0$

b_{ij} = Costo de construcción del arco potencial (i, j) (en $\$$) / $(i, j) \in A^p$, $b_{ij} \geq 0$

q = Tasa de descuento por periodo / $q \geq 0$

g_t = Presupuesto disponible de construcción de arcos según el período t (en $\$$) / $g_t \geq 0$, $t \in T$

k_j = Capacidad máxima de inventario en el nodo de salida j (en m³) /
 $j \in N^s$

3.2.4. Variables de decisión

$x_{pt} = 1$ Si se decide cosechar la totalidad de la parcela p en el período t ,
 $p \in P, t \in T$, 0 en otro caso

$y_{ijt} = 1$ Si se decide construir el arco potencial (i, j) en el período t , $(i, j) \in A^p$, $t \in T$, 0 en otro caso

f_{ijt} = Flujo de madera (en m³) en el arco (i, j) en el período t , $(i, j) \in A$,
 $t \in T$

z_{jt} = Inventario de madera (en m³) en el nodo de salida j , en el período t ,
 $t \in T \cup \{0\}$, $j \in N^s$

w_{jt} = abastecimiento de la demanda d_t que se realiza en el nodo de salida
 j , en el período t (en m³) / $j \in N^s, t \in T$

3.2.5. Restricciones

1. La suma de los flujos que llegan a un nodo de salida en un período dado y la madera almacenada para dicho nodo en el período anterior, tiene que ser igual a la demanda abastecida más el inventario de madera, en dicho nodo, en el período t :

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ijt} + z_{j, t-1} = w_{jt} + z_{jt}, \quad \forall j \in N^s, \forall t \in T$$

2. La suma del abastecimiento de demanda en los nodos de salida debe ser igual a la demanda en cada período:

$$\sum_{j \in N^s} w_{jt} = d_t, \quad \forall t \in T$$

3. En el caso del período previo al inicial ($t = 0$), el inventario de madera según nodo de salida $j \in N^s$ es z_{O_j}

$$z_{0j} = z_{O_j}$$

4. La suma de los flujos que llegan a un nodo de intersección, en un período dado, tiene que ser igual a la suma de los flujos que salen del mismo en dicho período:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ijt} = \sum_{(j,i) \in A} f_{jit}, \quad \forall j \in N^i, \forall t \in T$$

5. La suma de los flujos que salen de un nodo de origen, en un período dado, tiene que ser igual a lo cosechado en todas sus parcelas adyacentes en dicho período:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ijt} = \sum_{p \in P_i^a} s_p r_{pt} x_{pt}, \quad \forall i \in N^o, \forall t \in T$$

6. Capacidad de los arcos existentes según período:

$$f_{ijt} \leq u_{ijt}, \quad \forall (i,j) \in A^e, \forall t \in T$$

7. Capacidad del inventario en los nodos de salida:

$$z_{jt} \leq k_j, \quad \forall j \in N^s, \forall t \in T$$

8. Los arcos potenciales se pueden construir una sola vez en todos los períodos.

$$\sum_{t \in T} y_{ijt} \leq 1, \quad \forall (i,j) \in A^p$$

9. Si hay flujo en un arco potencial, ese arco debe estar construido y el mismo no puede exceder su capacidad.

$$f_{ijt} \leq u_{ijt} \sum_{t'=1}^t y_{ijt'}, \quad \forall (i,j) \in A^p, \forall t \in T$$

10. Restricción de adyacencia, no se puede cosechar una parcela adyacente a una cosechada en el mismo período.

$$x_{pt} + x_{qt} \leq 1, \quad \forall p \in P, \forall q \in P_p^c, \forall t \in T$$

11. Una parcela se puede cosechar solamente en un período.

$$\sum_{t \in T} x_{pt} \leq 1, \quad \forall p \in P$$

12. La cantidad de madera cosechada en cada período está acotada, se permite cosechar un máximo de o_t metros cúbicos en el período t .

$$\sum_{p \in P} s_p r_{pt} x_{pt} \leq o_t \quad \forall t \in T$$

13. El gasto en construcción de arcos en cada período está acotado por su presupuesto.

$$\sum_{(i,j) \in A^p} b_{ij} y_{ijt} \leq g_t \quad \forall t \in T$$

Naturaleza de las variables de decisión

$$14. x_{pt} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T$$

$$15. y_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A^p, \forall t \in T$$

$$16. f_{ijt} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A, \forall t \in T$$

$$17. z_{jt} \geq 0, \quad \forall t \in T \cup \{0\}$$

$$18. w_{jt} \geq 0, \quad \forall j \in N^s, \forall t \in T$$

3.2.6. Función objetivo

El objetivo del problema es minimizar el valor actual neto de los costos incurridos en el procesamiento, el almacenamiento y el transporte de la madera y la actualización de la caminería.

$$\sum_{t \in T} \frac{1}{(1+q)^t} \left(\sum_{j \in N^s} h_{jt} z_{jt} + \sum_{i \in N^o} \sum_{p \in P_i^a} s_p r_{pt} c_i x_{pt} + \sum_{(i,j) \in A} a_{ij} f_{ijt} + \sum_{(i,j) \in A^p} b_{ij} y_{ijt} \right)$$

La cosecha se planifica para varios periodos, es por esto que la primera sumatoria suma los costos de todos ellos. Dentro de dicha sumatoria y leyendo de izquierda a derecha, primero se representan los costos asociados al almacenamiento, posteriormente al procesamiento de la madera en los nodos origen, luego siguen los costos de transporte de madera por los arcos y por último se representa el costo de construcción de los arcos potenciales que se decidió construir.

3.3. Relevamiento y análisis de datos

Si bien los casos de estudio trabajados no tienen su base en un caso real específico, como puede ser la red forestal de una empresa, es deseable dimen-

sionar los parámetros del problema de forma tal que se manejen dentro de un rango de valores, que tome su magnitud en base a fuentes de la realidad que sean coherentes entre sí. Es atendible y no menor definir qué se entiende por coherencia, lo que se reduce a que las distintas fuentes utilizadas compartan un contexto determinado, a saber: una red forestal, por ejemplo, en un país de gran extensión es una potencial fuente de valores que suministrar a nuestros parámetros así como también lo es otra en un país de menor territorio. Es evidente que si se utilizan parámetros de ambos contextos, la red resultante no va ser representativa de una realidad determinada.

Con esto en consideración, se toma la decisión de basar los parámetros del modelo en datos estadísticos de empresas privadas y organismos estatales que operan en la República Oriental del Uruguay para los casos de estudio, no así para la etapa de validación del modelo. Al margen de esto, ciertos parámetros que pueden considerarse invariables con el contexto, particularmente los vinculados con las propiedades de la madera en sí misma, fueron extraídos de trabajos académicos para organismos internacionales, así como también otros que pueden estar restringidos al alcance de la población por su carácter confidencial.

A partir del relevamiento realizado, algunos datos fueron directamente cargados en los parámetros correspondientes, mientras que en otros casos se realizó un análisis de mayor minuciosidad de la información disponible, realizando promedios, estimaciones y ponderaciones para obtener los valores a utilizar.

A continuación se detallan las principales fuentes utilizadas y qué parámetros basan sus valores en la información que en ellas se encuentra, las versiones completas de los documentos mencionados pueden consultarse en los anexos de este trabajo:

- “Resumen público de Gestión Forestal 2019”, Montes del Plata, Uruguay, 2019 [24]. Este documento presenta dos datos de interés en base a los cuales se determinaron varios parámetros: los datos anuales de superficie cosechada y volumen cosechado. A partir de estos se determinó un orden de magnitud para la suma total de las superficies de las parcelas así como también para la demanda por período. A su vez, se obtuvo un rango de valores para el rendimiento de la superficie cosechada.

- “Plan de Manejo Forestal Grupo de Certificación 2019”, Montes del Plata, Uruguay, 2019 [25]. Para definir los valores a utilizar en el tamaño de las parcelas se tomó como base este documento, en función de las diferentes áreas cosechadas que tiene la empresa se fijó un conjunto de valores que pudiesen tomar las parcelas de la red.
- “Valoración de la madera en pie. una alternativa para el manejo adecuado de los recursos forestales” [26]. De este documento se obtuvo la información que sirvió de base para determinar el costo de procesamiento de la madera.
- “Precios de referencia Diciembre 2015” [27]. Como valores de referencia para el costo del transporte de la madera, se utilizó este documento del MTOP.

Por otra parte, consultando precios de alquileres de diferentes depósitos en la zona metropolitana de nuestro país, se estimó un valor para el costo de almacenamiento de madera que se presenta en el modelo. A su vez, en base a referencias profesionales, se logró obtener un estimativo del costo de construcción de carreteras.

3.4. Validación del modelo

La validación del modelo es el paso previo a trabajar con el mismo en situaciones de mayor interés y magnitud, entendiendo este último concepto como tamaño de las instancias de datos utilizadas. Este proceso es necesario para asegurarse que el modelo responda a ciertas situaciones de prueba antes de trabajar con las instancias de mayor porte.

Para poder realizar este proceso, se definieron seis instancias simples de trabajo, en base a tres configuraciones distintas para la red que representan los datos del problema. En cada instancia de datos se intentó representar una configuración en la que previamente se tenía un comportamiento esperable para la solución a obtener. Se buscó ir aumentando el grado de complejidad a medida que se agregaban instancias de prueba: comenzando por evaluar las decisiones que se tomaban en las soluciones referidas al transporte y la cosecha por redes con un reducido número de nodos y sin arcos potenciales para construir, continuando con un aumento en el número de nodos y el agregado de

arcos potenciales y finalizando con una red de trabajo de mayor complejidad en donde, ya habiendo sido comprobadas las decisiones antes mencionadas, se puso énfasis en la evaluación de aquellas que atañen al almacenamiento de materia prima en los nodos de salida.

Se presenta a continuación un resumen de las condiciones computacionales en las que fueron ejecutadas las instancias de validación del modelo:

- Lenguaje: MathProg - GLPK.
- Solver: GLPK LP/MIP solver, v4.65.
- Sistema Operativo: windows 7, 64 bits
- Procesador: Intel (R) Core (TM) i3-2120 CPU @ 3,30GHz
- Memoria RAM: 4,00 GB (3,87 GB utilizable)

Como comentario adicional se menciona que la transcripción del modelo algebraico al lenguaje computacional que utiliza GLPK se realizó con el editor de texto notepad++ (versión 7.8.8).

Se presenta en lo que resta de esta sección las cinco instancias de prueba diseñadas, así como sus resultados y las conclusiones que los mismos nos permiten expresar sobre el comportamiento del modelo diseñado. Al margen de los datos presentados como relevantes en las secciones siguientes, se puede consultar el resto de los mismos en el [Apéndice 2](#) de este trabajo

3.4.1. Primera instancia

3.4.1.1. Red

Dado que esta instancia es la primera, se decidió que contenga pocos elementos en cada conjunto para validar la compilación del modelo y los datos. A su vez, debido a la simplicidad de la red, es sencillo inferir intuitivamente las decisiones a tomar en cada etapa.

Comprobar que el comportamiento del modelo es coherente con la solución esperada es el objetivo de esta primera instancia. La misma cuenta con un horizonte de 3 periodos, donde no se pretenden evaluar las decisiones de construir arcos potenciales, ni discriminar la demanda abastecida ni el almacenaje en cada nodo de salida. Para esto, los parámetros y conjuntos asociados a lo que

no se desea evaluar no se inicializan y las variables de decisión correspondientes se ignoran en el análisis.

En la figura 3.1 se presenta una representación de la red contenida en la instancia.

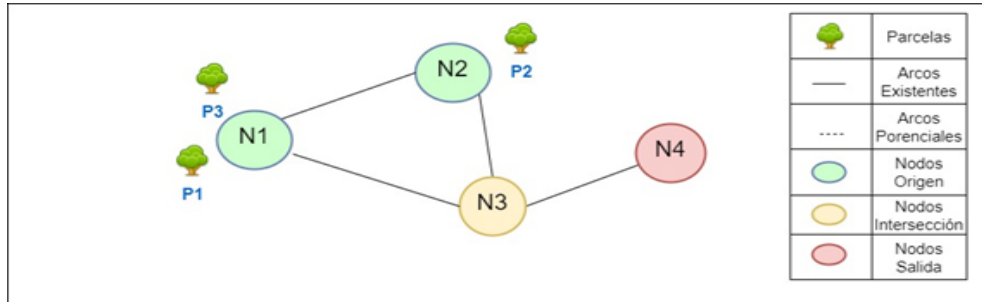


Figura 3.1: Esquema gráfico de la primera instancia

Se construye una red con 4 nodos los cuales se dividen en subconjuntos de la siguiente forma:

- Nodos origen: N1, N2
- Nodos intersección: N3
- Nodos salida: N4

Las parcelas adyacentes a cada nodo origen, se distribuyen de la siguiente manera:

- N1: Tiene accesos a las parcelas P1 P3
- N2: Tiene accesos a las parcelas P2

Las parcelas contiguas a cada parcela se describen de la siguiente manera:

- $Pc[P1] = P3$
- $Pc[P3] = P1$

3.4.1.2. Datos

A continuación se presenta la demanda por periodo como dato más relevante. Las demandas (en m^3) establecidas son las siguientes:

- Periodo 1: 3000
- Periodo 2: 12000
- Periodo 3: 25000

3.4.1.3. Resultados

Luego de resolver el modelo se obtuvo una solución óptima coherente. El modelo actuó en base a lo esperado, las restricciones reflejaron lo que motivó su construcción y el óptimo fue coherente con la solución que intuitivamente parece más razonable, siendo esto el objetivo que justifica la existencia de esta instancia de datos, se concluye que el modelo solventó la misma de manera exitosa.

En lo que respecta al detalle de la solución, el análisis más interesante que de esta se desprende es entender porqué el modelo propone cosechar la parcela P1 en el periodo 2, si se contaba con un inventario disponible que supera la demanda del periodo en cuestión. Esto se debe a que es menos costoso cosechar en el periodo 2, almacenar y satisfacer la demanda del periodo 3 con la reserva (situación 1), que satisfacer la demanda del periodo 3 cosechando en el mismo periodo (situación 2).

3.4.2. Segunda instancia

3.4.2.1. Red

En esta instancia se decidió aumentar la complejidad de la red, por lo que se utilizó una red con 9 nodos que se repartían como sigue: 3 nodos origen, 4 de intersección y 2 de salida de madera. La red está compuesta por 11 arcos de los cuales 8 son arcos existentes y 3 son potenciales; la cantidad de parcelas configurada fue 8. La Figura 3.2 muestra la red descrita.

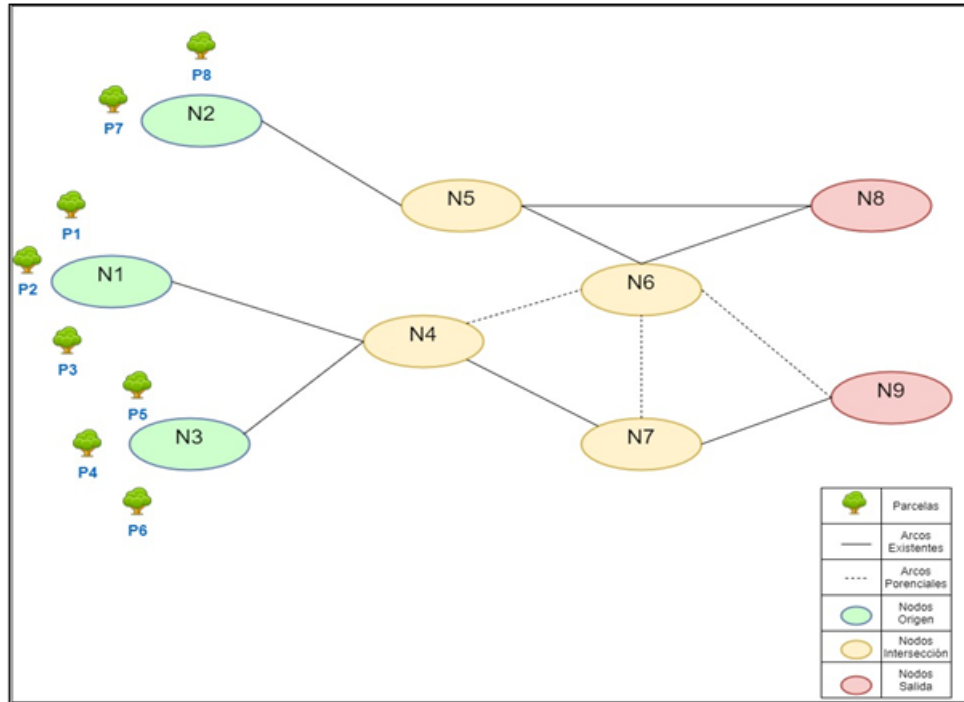


Figura 3.2: Esquema gráfico de la segunda instancia

Se construye una red con 9 nodos los cuales se componen en:

- Nodos origen: N1, N2, N3
- Nodos intersección: N4, N5, N6, N7
- Nodos salida: N8, N9

Las parcelas contiguas a cada nodo origen, se distribuyen de la siguiente manera:

- N1: Tiene accesos a las parcelas P1, P2, P3
- N2: Tiene accesos a las parcelas P8, P7
- N3: Tiene accesos a las parcelas P4, P5, P6

Las parcelas contiguas de cada parcela se pueden apreciar en la Figura 3.2. Cabe aclarar que la contigüidad no es lineal. Esto determina que las parcelas P1 y P3, y las parcelas P5 y P6, no son contiguas. Durante esta instancia se validó específicamente el comportamiento en referencia a los arcos potenciales y una mayor cantidad de parcelas contiguas; además del cumplimiento de los aspectos generales de demanda y almacenamiento total.

Se omiten del análisis otros aspectos específicos del modelo que serán considerados en las próximas instancias.

3.4.2.2. Datos

Se utilizaron 5 periodos y el parámetro demanda (en m^3) para cada uno es:

- Periodo 1: 10
- Periodo 2: 10
- Periodo 3: 15
- Periodo 4: 15
- Periodo 5: 25

3.4.2.3. Resultados

El modelo arrojó resultados esperables. Al incluir arcos potenciales en la red, la misma se diseñó de manera tal que lo esperable fuese que en la solución se decidiera no construir arcos potenciales y esto fue lo que sucedió.

Por otra parte, habiendo aumentado la cantidad de parcelas que contaban con otras contiguas, el modelo no tuvo inconvenientes a la hora de hacer cumplir el conjunto de restricciones de adyacencia. Esto se tradujo en un valor objetivo de USD 2.261

3.4.3. Tercera instancia

3.4.3.1. Red

En la tercer instancia de prueba, se utilizó la red presentada en la [subsección 3.4.2.1](#), pero se modificaron las capacidades de los arcos existentes en el conjunto de datos, de manera de restringir la solución óptima y que sea necesario para satisfacer la demanda construir caminos potenciales, con el objetivo de evaluar el correcto funcionamiento de la variable de decisión $y_{i,j,t}$.

3.4.3.2. Datos

Como se mencionó anteriormente, esta instancia tiene como única variante la disminución de la capacidad del arco (N4,N7) a 10 m^3 por período, de manera de obligar a que sea necesario construir un arco potencial.

Se construye una red con 11 nodos los cuales se configuran en:

- Nodos origen: N1, N2, N3, N4, N11
- Nodos intersección: N5, N6 , N7
- Nodos salida: N8, N9, N10

Las parcelas adyacentes a cada nodo origen, se distribuyen de la siguiente manera:

- N1: Tiene accesos a las parcelas P11 P12 P13 P14.
- N2: Tiene accesos a las parcelas P21 P22.
- N3: Tiene accesos a las parcelas P31 P32.
- N4: Tiene accesos a las parcelas P41.
- N11: Tiene accesos a las parcelas P111.

3.4.4.2. Datos

Las demandas (en m³) establecidas son las siguientes:

- Periodo 1: 10
- Periodo 2: 10
- Periodo 3: 15
- Periodo 4: 20

3.4.4.3. Resultados

Luego de resolver el modelo con GLPK, se obtuvieron resultados coherentes. El costo obtenido en la función objetivo es de USD 1.383 Los datos a continuación, corroboran la distribución de la demanda total de cada periodo según los nodos de salida, los mismos se representan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Abastecimiento de la demanda en m³ según nodo de salida y periodo

		Periodos			
		1	2	3	4
Nodos	N8	5,5	1	9,5	2
	N9	0	0	0	0
	N10	4,5	9	5,5	18

3.4.5. Quinta Instancia

3.4.5.1. Red

En esta instancia de prueba, se utilizó la misma red que en la [sección 3.4.2.1](#) y se evaluó la capacidad máxima de inventario por nodo de salida así como también el costo de almacenamiento por nodo de salida y por período.

3.4.5.2. Datos

Se estableció un almacenamiento inicial nulo en los nodos de salida N8 y N9. Se fijó el mismo costo de almacenamiento para los nodos de salida en cada período.

3.4.5.3. Resultados

Se logró visualizar en qué nodos de salida se acopiaba el inventario. El mismo se muestra para cada período en la tabla :

Tabla 3.2: Inventario según nodo de salida y período.

Abastecimiento	Cantidad (m ³)
z[N8,1]	0
z[N9,1]	3,5
z[N8,2]	0
z[N9,2]	2,5
z[N8,3]	0
z[N9,3]	2,5
z[N8,4]	0
z[N9,4]	4
z[N8,5]	0
z[N9,5]	3
z[N8,0]	0
z[N9,0]	0

La solución resultó en construir el arco (N4,N6) en el periodo 4 y lo utilizó en el periodo 5 (unificando flujos). El valor óptimo es USD 2.711 mayor que el de la instancia 3 debido al aumento en los costos de almacenamiento por nodo configurado en la instancia de datos. Se concluye que es posible determinar el lugar óptimo para acopiar la madera por período y cuánto volumen por período se almacena, pudiendo utilizarse estos datos para la toma de decisiones.

3.4.6. Sexta instancia

3.4.6.1. Red

Para esta instancia de pruebas, se utilizó la misma red que en la [sección 3.4.2.1](#), enfocándose en evaluar la variable de abastecimiento de demanda por cada nodo de salida y periodo.

3.4.6.2. Datos

El conjunto de datos utilizados es el mismo que para la quinta instancia ya que las modificaciones en el modelo no incluyeron parámetros nuevos ni fue necesario modificar los existentes.

3.4.6.3. Resultados

La información obtenida de la salida luego de ejecutar el modelo, arroja las siguientes distribuciones de la demanda total representadas en la tabla 3.3:

Tabla 3.3: Abastecimiento de la demanda en m³ según nodo de salida y periodo

		Periodos				
		1	2	3	4	5
Nodos	N8	10	3,5	15	15	11
	N9	0	6,5	0	0	14

El valor óptimo es USD 2.711, el mismo que en la instancia 5. Este resultado era esperado, ya que se buscó evaluar la coherencia del almacenamiento y no permitir que se acopie madera en lugares que nunca tuvieron flujo o almacenamiento anterior. Además, analizando los datos se puede obtener información sobre cuánto se utilizó de cada inventario almacenado en cada nodo de salida y período para satisfacer la demanda y cuanto de la demanda se satisface a partir de lo cosechado en el mismo período.

A continuación se refleja el análisis con un ejemplo de los datos: como análisis se evalúa el período 5 en el cual se cosecharon 24 m³ y se enviaron 14 m³ al nodo N8 y 10 m³ al nodo N9. Previamente en el periodo 4, en el nodo N9 se habían almacenado 4 m³, por lo que la suma entre lo almacenado y lo

cosechado son 28 m³ en total, siendo para este período la demanda 25 m³ y por tanto siendo necesario almacenar en el período 5,3 m³.

Como se puede apreciar en los datos presentados anteriormente, según la variable $w_{j,t}$ se abasteció de la demanda 11 m³ desde el N8 y 14 desde el N9, generando un inventario en el nodo N8 de 3 m³ y utilizándose el inventario disponible desde el período 4 en el N9. Se concluye que la variable de decisión de abastecimiento de la demanda por nodo de salida y periodo $w_{j,t}$, refleja el comportamiento esperado. El modelo respetó las capacidades máximas de almacenamiento por nodo de salida, habilitó arcos potenciales que utilizó en periodos posteriores a la habilitación y utilizó los caminos menos costosos para transportar la madera. Por ende, el modelo arrojó resultados coherentes a los datos parametrizados inicialmente por lo que se da por validado el mismo. Como comentario final, se pueden apreciar en la tabla 3.4 los resultados para las variables de almacenamiento $z_{j,t}$.

Tabla 3.4: Inventario según nodo de salida y período.

Abastecimiento	Cantidad (m ³)
$z[N8,1]$	3,5
$z[N9,1]$	0
$z[N8,2]$	0
$z[N9,2]$	2,5
$z[N8,3]$	0
$z[N9,3]$	2,5
$z[N8,4]$	0
$z[N9,4]$	4
$z[N8,5]$	3
$z[N9,5]$	0
$z[N8,0]$	0
$z[N9,0]$	0

Capítulo 4

Casos de estudio

El presente capítulo se enmarca en la generación de instancias de datos de mayor tamaño donde se persiguen dos objetivos; por un lado, evaluar los resultados de la ejecución del modelo, en software conocido, cuando se introducen grandes volúmenes de datos, aumentando para ello, la cardinalidad de los conjuntos; el segundo objetivo es realizar un análisis de sensibilidad de los principales costos involucrados en el modelo. Para el abordaje de los temas mencionados anteriormente, se elaboró un conjunto de instancias de datos, a su vez, para cada instancia, se detallan las características de la red generada y se comentan los principales parámetros introducidos.

4.1. Red

Se presenta la red utilizada para los casos de estudio. La misma se diseñó con el objetivo de que contenga el potencial de abarcar un amplio conjunto de datos, con el fin de comprobar si el modelo es capaz de darle tratamiento a una instancia de datos de mayor volumen que las utilizadas en la validación.

- Nodos origen: 25
- Nodos salida: 10
- Nodos intersección: 40
- Arcos totales: 111
- Arcos existentes: 83
- Arcos potenciales: 28
- Parcelas : 45, en grupos de hasta tres integrantes, con el siguiente criterio de contigüidad: en los conjuntos con tres elementos, los elementos

nomenclados con los subíndices máximo y mínimo de los utilizados en el conjunto no son contiguos entre sí y sí lo son al elemento restante (ej: si un conjunto está compuesto por las parcelas [P1, P2, P3], P1 y P3 son contiguas a P2). En aquellos que cuentan con dos elementos, estos son contiguos entre sí. Las parcelas que son único elemento en su conjunto, no tienen parcelas contiguas.

Como comentario al margen, se deja constancia de que más allá de lo presentado en los análisis de resultados o de sensibilidad, la configuración completa de los datos de todos los casos de estudio pueden ser consultados en el [Apéndice 2](#) de este trabajo.

La figura 4.1 muestra una representación gráfica de la red y sus componentes. se recomienda al lector enfáticamente realizar un análisis más detallado de la misma desde la imagen de origen adjunta en los apéndices.

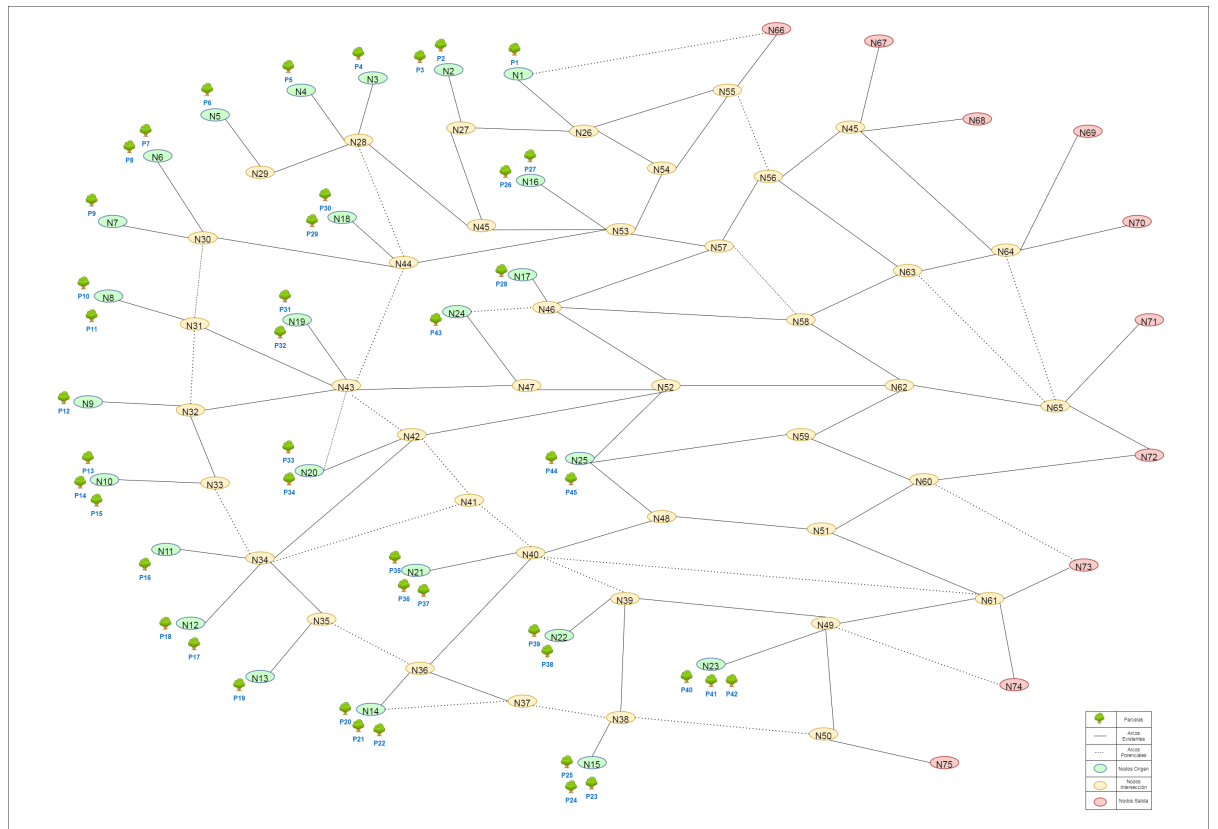


Figura 4.1: Red utilizada en los casos de estudio

4.2. Tiempo de ejecución

El criterio utilizado para limitar el tiempo de ejecución en los casos de estudio es un criterio que contempla el valor del MIP-Gap y su tasa de reducción según el tiempo de ejecución. De esta manera, además de utilizar un valor aceptable, se busca no realizar esfuerzos computacionales que no impacten significativamente en el mismo. En el caso del análisis de sensibilidad, en algunos casos, se agrega a este criterio la facilidad para el análisis de tendencias que permite la solución obtenida. Esto explica que en algunos casos, se exceda el tiempo para el cual la variación del MIP-Gap deja de ser significativa en función del tiempo de ejecución.

4.3. Caso 1

4.3.1. Objetivos

En el primer caso construido a partir de la red presentada en este capítulo se busca cumplir con el objetivo inicial de estudiar el comportamiento del modelo ante un conjunto de datos de mayor porte.

4.3.2. Descripción de la instancia

Se define una instancia de datos que se entiende representativa de lo que se pretende evaluar en el objetivo planteado. La misma se compone de un horizonte de planificación que cuenta con 6 periodos y una demanda promedio anual establecida en base a los datos relevados. La tabla 4.1 presenta los valores de dicha demanda por periodo, parámetro que da una idea de las magnitudes que se manejan en este caso de estudio.

Tabla 4.1: Demanda de madera según periodo.

Periodo	Demanda (m ³)
1	2.400.000
2	2.520.000
3	2.646.000
4	2.778.300
5	2.917.210
6	3.063.070

4.3.3. Análisis y resultados del caso

Dado el tamaño y la complejización del problema, el solver toma un tiempo demasiado extenso para llegar a la solución óptima (con una demora de más de 10 minutos). El mismo se considera excesivo para esta instancia, considerando los criterios presentados en la [sección 4.2](#). En este sentido se decide limitar el tiempo de ejecución a 180 segundos, ya que en cierto punto el MIP-gap era pequeño y no variaba con el pasar del tiempo, por lo que se optó por considerar su valor aceptable. Al momento de interrumpir la ejecución, el valor del óptimo no está más allá de un 0,8 % del valor de la solución obtenida (MIP-Gap). El valor de esta última fue de USD 1.232.700.672, donde se cosecharon un total de 21 parcelas de las 45 disponibles. Además se construyeron 4 arcos potenciales, los cuales son: (N40, N61) en el periodo 1, (N38, N50), (N49, N74) en el periodo 2 y el (N1, N66) en el periodo 4. Para el final del periodo 6, queda un volumen almacenado remanente de 41.420 m³.

De manera de poder realizar un análisis de los resultados obtenidos, para esta y el resto de las instancias, se decide procesar los datos de salida del solver para así obtener dos gráficos por instancia: el de volumen cosechado y almacenado según periodo y el de volumen almacenado y abastecido según nodo de salida. La explicación de los mismos se realiza en esta primera instancia y para el resto solo se realiza su análisis. La comparación del volumen cosechado por periodo con lo que se almacena da una idea del destino de la madera cosechada. Para este caso los mismos guardan coherencia, donde para cada periodo lo almacenado es considerablemente menor que lo cosechado, es decir que mayoritariamente lo cosechado se destina a abastecer la demanda y no a almacenarla. Por otra parte, el volumen almacenado decrece con el avance temporal, por lo que puede concluirse que, exceptuando el primer periodo, se almacena menos de lo que se abastece desde el volumen almacenado. Esto es coherente con la idea intuitiva de que la magnitud del mismo al final del horizonte temporal sea la menor posible, lo que permite concluir un correcto desempeño del modelo en este apartado.

Por otra parte, la gráfica de volumen almacenado y abastecido según nodo de salida, da una idea de la circulación del volumen almacenado en cada nodo. Las barras azules son la suma sobre todos los periodos del valor de la variable

asociada al volumen almacenado por nodo. Un valor acumulado de similar o mayor valor a la demanda abastecida desde ese nodo, da cuenta de que el volumen almacenado allí se consumió en varios periodos, el caso contrario (que es el que se presenta para esta instancia de datos) muestra que el volumen almacenado se consumió en pocos periodos.

Para esta instancia, no se reportan actividades en los nodos N69, N70 y N71. Para el resto de los nodos, dado que el volumen almacenado es mucho menor que el abastecido, la circulación del volumen almacenado es grande. Esto es coherente si se repara en el hecho de que la demanda total y lo cosechado son valores de un orden similar, lo que obliga a utilizar un alto porcentaje de lo que llega a los nodos de salida en cada periodo para abastecer la demanda. A su vez, que ningún nodo en particular tenga una baja rotación se debe al hecho de que los costos de almacenamiento en todos los nodos de salidas son iguales entre sí para cada periodo.

Las figura 4.2 y 4.3 resumen lo descrito en los últimos dos párrafos para este primer caso de datos.

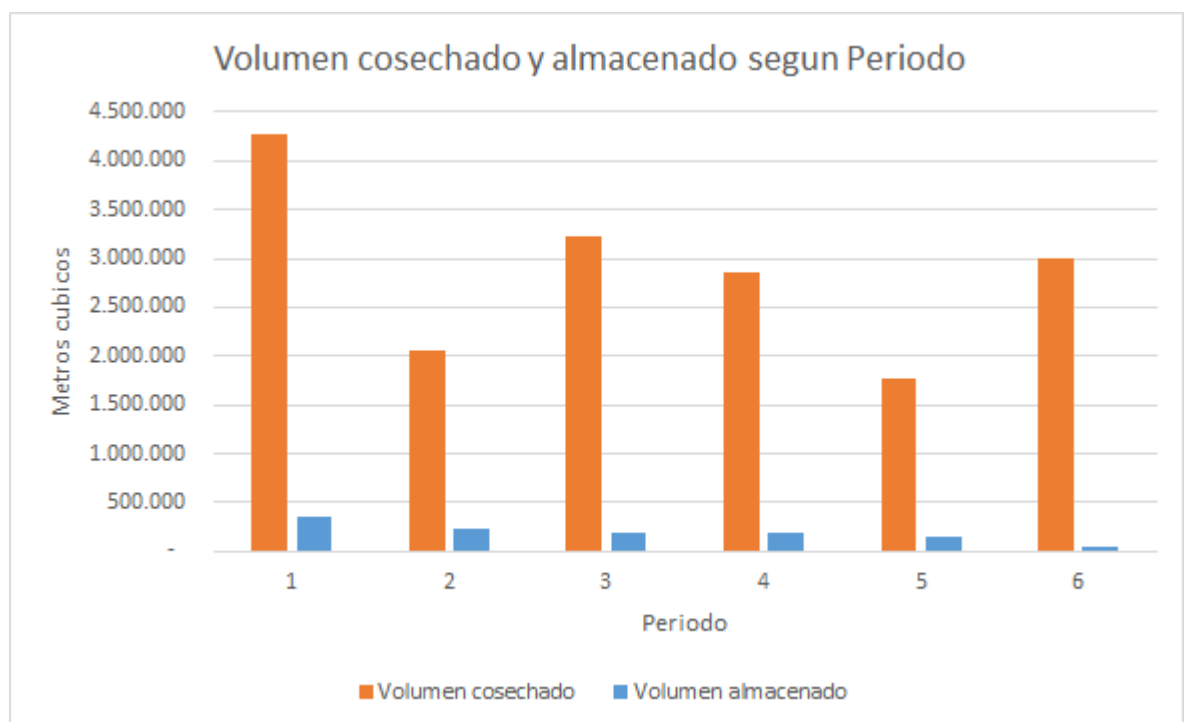


Figura 4.2: Volumen cosechado y almacenado según Periodo

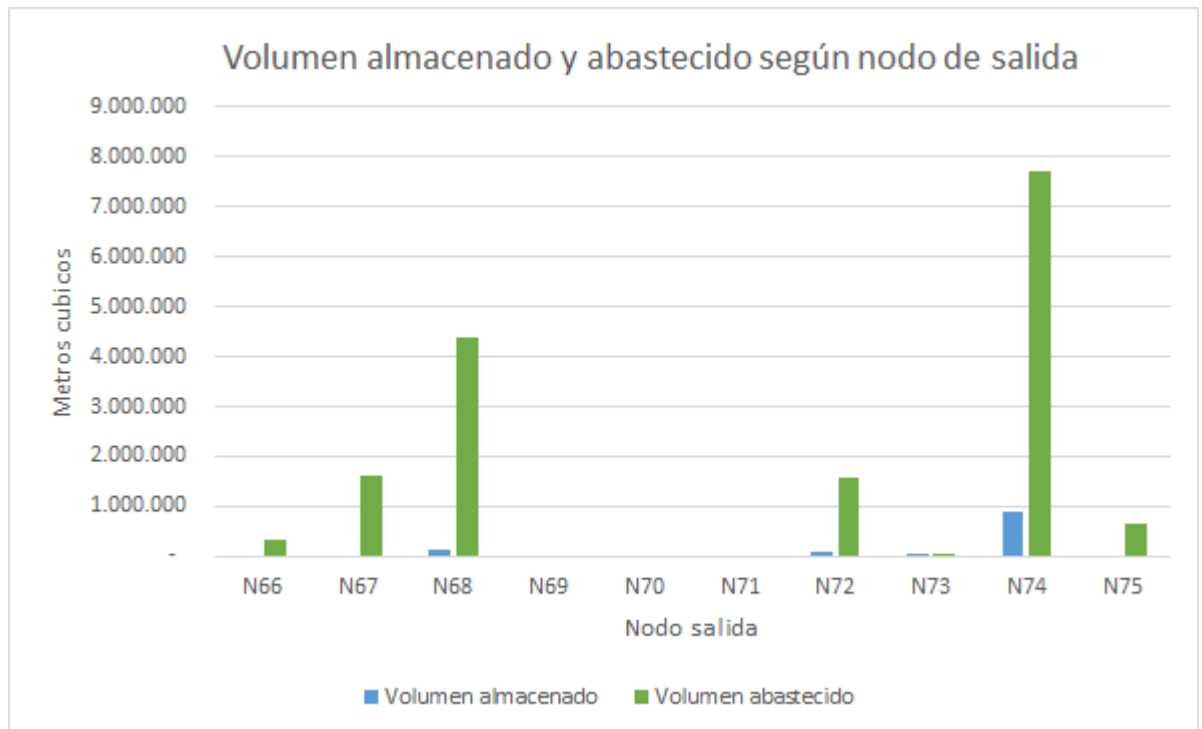


Figura 4.3: Volumen almacenado y abastecido según nodo de salida.

4.4. Caso 2

4.4.1. Objetivos

En el segundo caso se pretende analizar el tiempo de computación requerido para encontrar una solución factible con un MIP-Gap aceptable al aumentar la cantidad de periodos a diez.

4.4.2. Descripción de la instancia

Se incrementan la cantidad de periodos considerados a diez y se mantienen los valores promedio de demanda estimada para los primeros seis periodos, a partir de los relevamientos de información realizados. Para los cuatro periodos restantes se aumenta la demanda con el mismo criterio utilizado para el aumento en los periodos anteriores.

A continuación en la tabla 4.2 se muestran los datos de demanda utilizados según periodo.

Tabla 4.2: Demanda de madera según periodo.

Periodo	Demanda (m ³)
1	2.400.000
2	2.520.000
3	2.646.000
4	2.778.300
5	2.917.210
6	3.063.070
7	3.126.230
8	3.377.040
9	3.545.890
10	3.723.180

4.4.3. Análisis y resultados caso

Debido al tamaño de la red y el aumento de la cantidad de periodos, el tiempo de ejecución para encontrar la solución óptima se extendió. Dado esto se decidió limitar el tiempo de ejecución del solver a un valor de 180 segundos, con el objetivo de poder comparar las soluciones con la [sección 4.3](#). La solución obtenida para esta instancia fue de USD 2.449.024.999, con un MIP-gap de 2,1 %. Previo a realizar un análisis más detallado de la solución, se pueden realizar comentarios generales con respecto a la misma:

1. Fueron construídos 6 arcos potenciales
2. Considerando todos los periodos se observa que se cosechó un alto porcentaje de la totalidad de las parcelas; considerando la restricción de contigüidad y los valores del rendimiento de las mismas en comparación con la demanda, este es un resultado esperable.
3. El volumen almacenado final de 31.080 m³ es despreciable con respecto al orden del resto de los valores que se maneja de demanda.

A grandes rasgos, la solución obtenida parece seguir un comportamiento acorde a lo esperado. En lo que respecta al análisis común a todas las instancias, sobre el volumen cosechado y almacenado según periodo se puede inferir que debido a que la madera cosechada es del orden del valor de la demanda en cada periodo, es de esperar que un porcentaje mayoritario de lo cosechado sea destinado a satisfacer la misma.

La figura 4.4 muestra las magnitudes mencionadas.

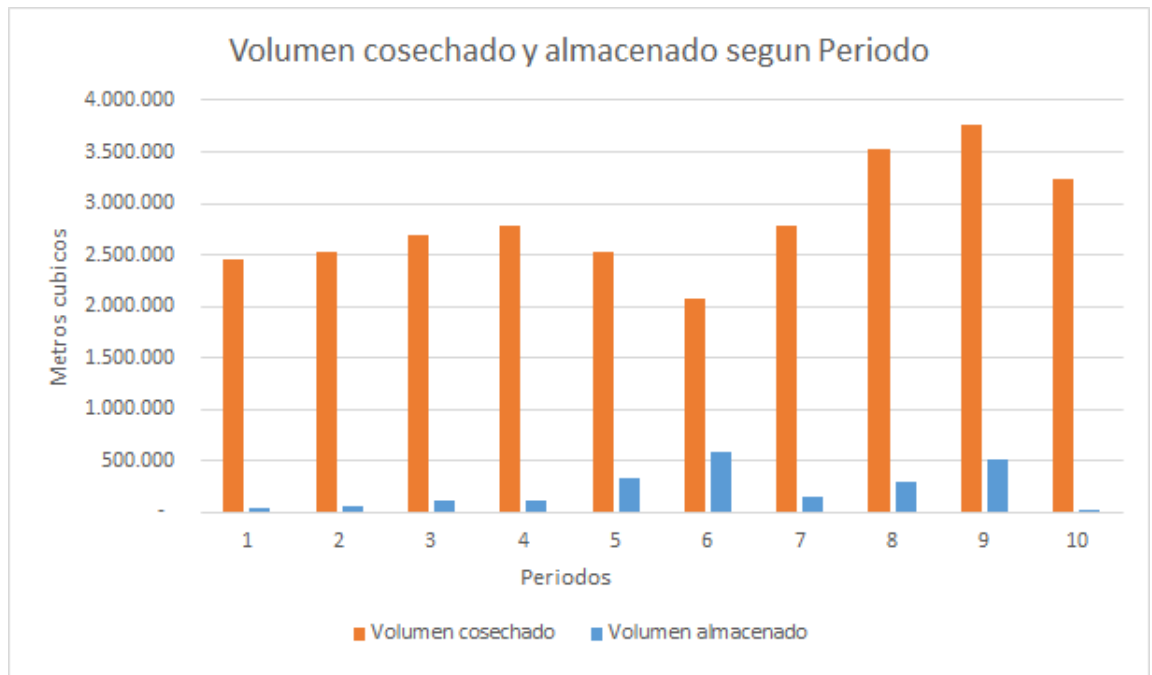


Figura 4.4: Volumen cosechado y almacenado según Periodo

Como se observa en la figura 4.4, el modelo confirma la intuición presentada en el análisis del párrafo anterior. Además, puede concluirse que desde el primer periodo hasta el sexto el modelo almacena más de lo que abastece desde el volumen almacenado con el que cuenta, esto se refleja en un aumento del volumen almacenado para cada periodo. Esta tendencia se revierte en el séptimo periodo, donde se observa que se cosecha menos volumen que en los periodos anteriores ya que se utilizará el stock para cumplir con la demanda; la tendencia de aumentar el stock se retoma en el octavo hasta el noveno y se abandona en el décimo, siendo esto último coherente con la idea intuitiva de conservar el menor volumen almacenado posible al final del horizonte de planificación. En particular, esta idea se debe a que existen costos de inventario. Si la producción fuera continua el inventario sería nulo. Pero no lo es, debido a que en cada periodo se cosecha la totalidad de las parcelas que se decide cosechar. Esta idea es aplicable a todas las instancias de datos realizadas.

Lo expuesto en relación al volumen almacenado y abastecido según nodo de salida en [sección 4.3.3](#), también aplica para la presente instancia. Más allá del cambio en la cardinalidad del conjunto de periodos, los aspectos que justifican el análisis se mantienen. La figura 4.5 lo muestra gráficamente.

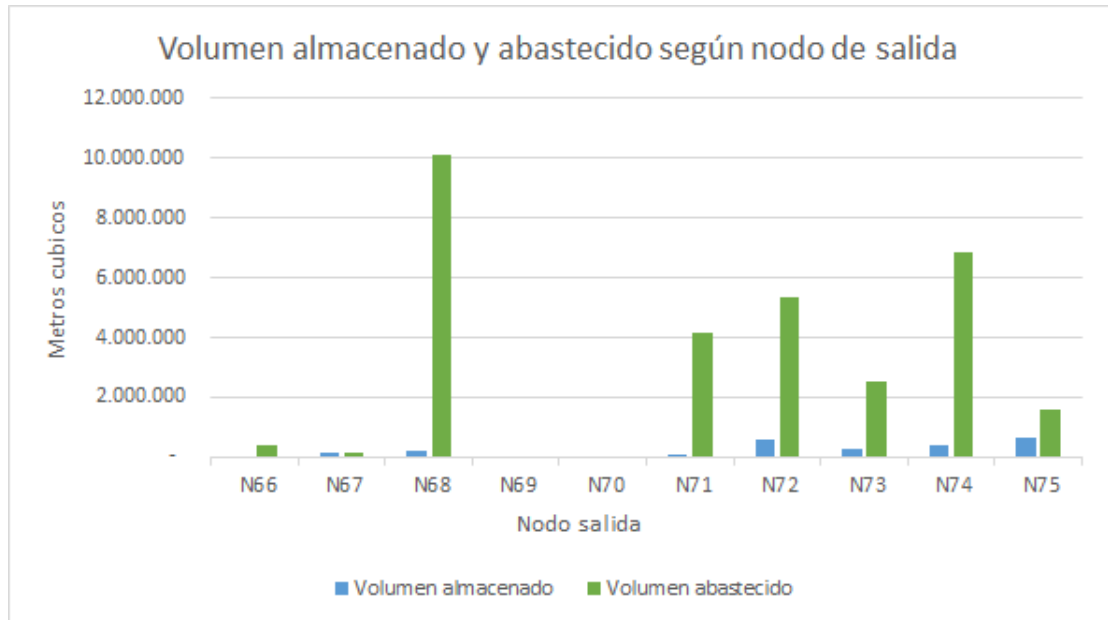


Figura 4.5: Volumen cosechado y abastecido según Periodo

4.5. Caso 3

4.5.1. Objetivos

En esta oportunidad, se configuró el conjunto de datos para evaluar la respuesta del modelo a una red con una demanda reducida. Se decidió utilizar valores del orden del 10 % de los que se venían utilizando.

4.5.2. Descripción de la instancia

Esta instancia está basada en la descrita en la [sección 4.4.2](#), cuenta con un horizonte temporal de diez periodos pero, como se mencionó en la [sección 4.5.1](#) se altera la demanda de la misma. La tabla 4.3 muestra la mencionada demanda reducida al orden del 10 % de la anterior.

Tabla 4.3: Demanda de madera según periodo.

Periodo	Demanda (m ³)
1	140.000
2	152.000
3	164.600
4	177.830
5	191.721
6	106.307
7	121.623
8	137.704
9	154.589
10	172.318

4.5.3. Análisis y resultados

En base a los criterios presentados en la [sección 4.2](#), se limitó el tiempo de ejecución a 180 segundos y la solución alcanzada tuvo un 5,6 % de MIP-gap. A su vez el costo fue de USD 98.995.830,3.

Se detallan a continuación los datos más relevantes de la solución alcanzada:

- Fueron construidos tres arcos potenciales: (N38,N50), (N1,N66), (N49, N74).
- En los periodos 3, 5, 6, 8 y 10 no se cosechó.
- El volumen almacenado final de 46.308 m³ es despreciable con respecto al orden del resto de los valores que se maneja.
- No se utilizan los nodos salida N69,N70,N71,N72,N73.
- Un 43 % aproximadamente del volumen de demanda se abastece desde el nodo de salida N75.

Analizado los datos obtenidos, se observan dos tipos de comportamientos. En primer lugar, en los periodos 3, 5, 6, 8 y 10 no se cosecha ninguna parcela. En segundo lugar existen periodos donde la acumulacion del volumen almacenado es mayor que lo cosechado, debido a que se cosecha para almacenar y luego abastecer la demanda de periodos futuros desde lo almacenado. Se realiza esta acción hasta que no haya suficiente volumen almacenado para abastecer la demanda del periodo siguiente (entonces se vuelve a cosechar). Esto es el caso de los periodos entre [2,3]; [4,7] y [9,10].

Como soporte para el análisis realizado, las figuras 4.6 y 4.7 presentan el volumen cosechado y almacenado según periodo y el volumen almacenado y abastecido según nodo de salida respectivamente.

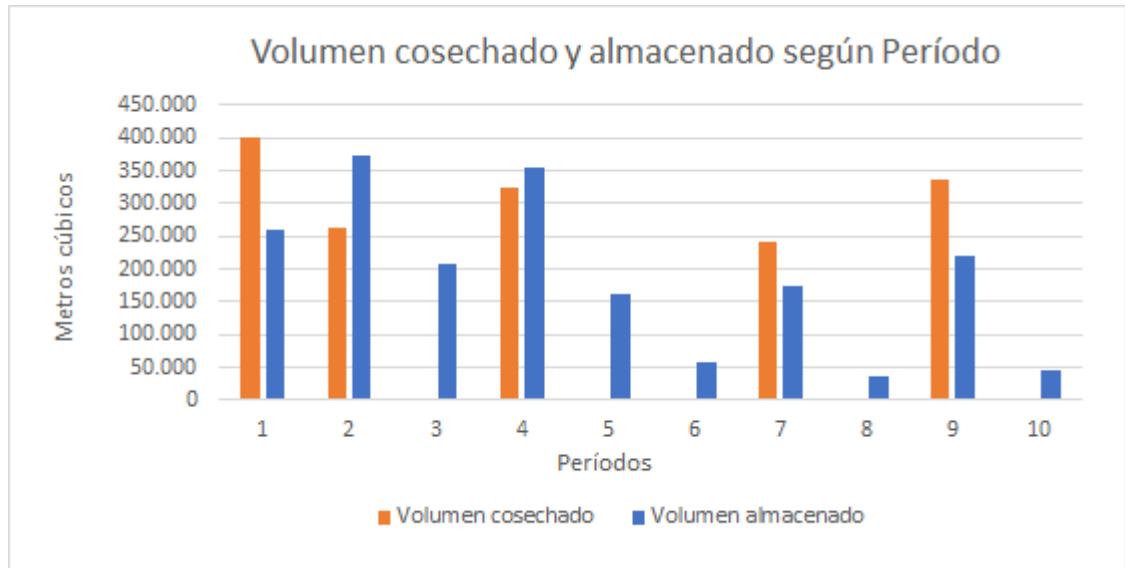


Figura 4.6: Volumen cosechado y almacenado según Período

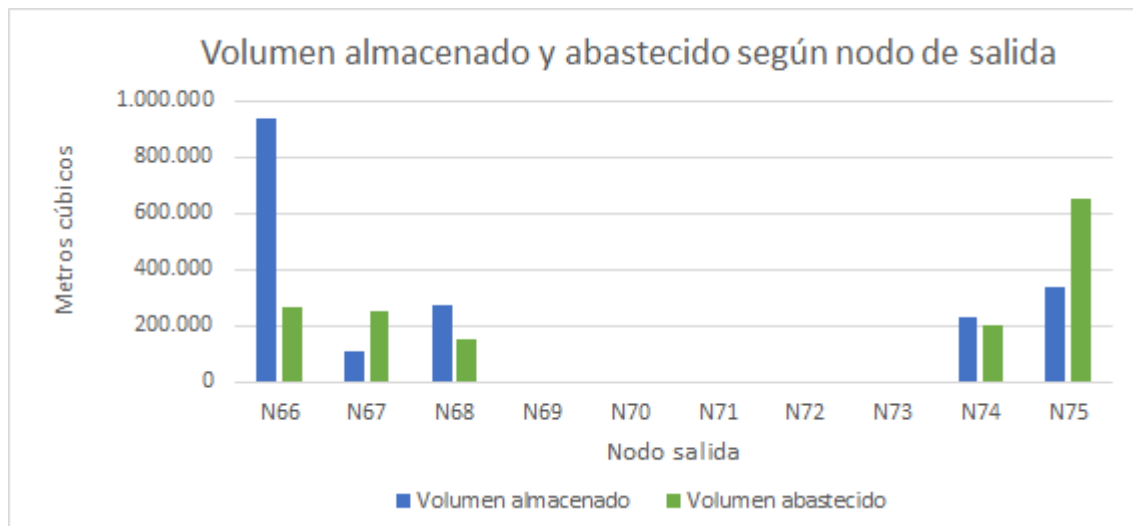


Figura 4.7: Volumen cosechado y almacenado según Período

En esta gráfica se decide analizar el comportamiento en el nodo N66 ya que el acumulado de volumen almacenado en los periodos es mucho mayor que lo abastecido desde el nodo. Lo que sucede es lo siguiente, al nodo N66 le llega 264.000 m³ de madera en el periodo 2, pero no abastece la totalidad

de la demanda desde dicho nodo, el volumen almacenado de madera en cada periodo se ilustra en la tabla 4.4:

Tabla 4.4: Volumen almacenado por periodo en el nodo N66

Periodo	Volumen almacenado en N66 (m ³)
1	0
2	250.000
3	207.400
4	207.400
5	162.849
6	56.542
7	56.542
8	0
9	0
10	0

Luego la suma del volumen almacenado en cada periodo suma 940.733 m³. Esto se puede deber a que al tener una baja demanda en comparación con la productividad de las parcelas y las restricciones de cosechar toda la parcela y cumplir con la demanda, lleva a que sea más conveniente acumular volumen almacenado e ir utilizando el mismo como una amortiguación frente a faltantes para cumplir la demanda, con parcelas más “baratas”.

4.6. Caso 4

4.6.1. Objetivos

Se busca evaluar la respuesta del modelo diseñado para una cantidad de periodos mayor a las utilizadas en las [secciones 4.1](#), [4.2](#) y [4.3](#). Esto generará una mayor cantidad de variables binarias sobre las cuales tomar decisiones, lo que implicará un mayor esfuerzo computacional.

4.6.2. Descripción de la instancia

Para esta cuarta instancia, se agregaron periodos hasta elevar el total a veinte, en consonancia con el objetivo planteado.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la demanda en diez años consumía prácticamente toda la madera que provenía de las parcelas cosechadas (en el

entorno de veinte), y que debido a las restricciones de adyacencia y unicidad de la cosecha de una parcela en el horizonte temporal no es razonable pensar que pueda cosechar un número significativamente mayor de parcelas en la red, se decidió aumentar la superficie cosechable de las parcelas. Entendiendo este aumento como la opción más razonable de modificación en los parámetros que evitaría no obtener solución factible por insatisfacción de la demanda.

4.6.3. Análisis y resultados del caso

Una vez construida esta instancia y ejecutada la misma, el solver no encontró una solución en un tiempo computacional aceptable (menor a tres horas). Es coherente pensar que esto es debido al aumento en el número de variables binarias (de 712 en el caso 3 a 1460 en la presente instancia).

No obtener una solución para esta instancia de datos no es coherente con el objetivo de que el modelo realizado pueda ser soporte para la planificación de la cosecha forestal en el largo plazo. Debido a esto, se deben evaluar opciones que permitan la resolución del problema en un tiempo computacional aceptable.

Para la resolución del problema bajo este conjunto de datos, se evaluaron tres caminos posibles, uno que apunta a reducir la cantidad de variables binarias que maneja el solver (en adelante C1), otro que apunta a resolver el mismo con un software más potente (en adelante C2) y un tercero que apunta a utilizar técnicas basadas en heurísticas para simplificar el manejo del conjunto de datos por parte del solver (en adelante C3). Se desarrolla a continuación el camino C1, el equipo de trabajo se decidió por esta opción dado que se alcanzaron resultados satisfactorios al explorar esta línea de trabajo.

Si se toma en cuenta la demanda original, el escenario descrito simula un horizonte temporal de veinte años o, dicho de otro modo, toma cada periodo como dos de los originales, sumando sus demandas.

La distribución de la misma se presenta en la tabla 4.5

Tabla 4.5: Demanda de madera según periodo.

Periodo	Demanda (m ³)
1	4.920.000
2	5.424.300
3	5.980.291
4	6.593.271
5	7.269.081
6	8.014.161
7	8.835.613
8	9.741.264
9	10.739.743
10	11.840.566

Luego de ejecutar la instancia modificada en GLPK, se obtuvieron resultados más satisfactorios. Al reducir la cantidad de variables del problema, el solver logra encontrar una solución (1,8 % de MIP-gap) en un tiempo de seiscientos segundos. El valor de dicha solución es de USD 6.224.181.418.

Además:

- Se construyen cinco arcos potenciales: (N28,N44) (N49,N74) en el periodo 1, (N35,N36) en el periodo 2, (N14,N37) en el periodo 4 y (N56,N55) en el periodo 5.
- Se observa que en todos los periodos se cosecha alguna parcela.
- Queda un volumen almacenado remanente de: 190.000 m³ en el nodo de salida N74, 700 m³ en el nodo N71, 70.000 m³ en el N73 y de 80.210 m³ en el nodo N75.
- El nodo N69 no fue utilizado ni para almacenamiento ni para abastecimiento.
- El nodo de salida de donde se abasteció la mayor cantidad de la demanda total fue el N74, con un total de 26.900.000 m³.

4.7. Análisis de sensibilidad

En esta sección se presenta un análisis del impacto de la variación en los principales costos del modelo. Se decide variar los costos de almacenamiento y transporte un 20 % por encima y por debajo, mientras que el costo asociado al procesamiento en los nodos origen se establece 15 % de variación. El módulo de dicha variación se determinó tomando en cuenta la variabilidad que pueden ad-

quirir los distintos costos en 10 años, considerando la hipótesis de que los costos de procesamiento son menos propensos a sufrir variaciones de gran magnitud que los de almacenamiento o transporte, donde quizá una nueva tecnología o imposición legal puede hacer que los mismos varíen en mayor magnitud. Por otro lado el hecho de que se evalúe el aumento y la disminución de dicho costo es para poder representar distintas situaciones; por un lado una situación de aumento en los costos debido a inflación por ejemplo o aumento del precio del combustible, mientras que una disminución en los costos podría ser justificada por la implementación de tecnologías que permitan ejecutar los procesos de manera más eficiente.

Para la realización del análisis se utilizó el caso de estudio de la [sección 4.4](#), la cual consta de diez periodos. En dicho caso se modificaron los parámetros de costo de forma individual para poder medir su impacto, y se generaron seis instancias de datos, dos por cada costo analizado.

Luego de ejecutar el solver con algunos conjunto de datos, imponiendo un tiempo máximo de ejecución de 180 segundos, se encuentra que las soluciones tienen un MIP-Gap entre el valor obtenido y la mejor solución que podría llegar a encontrarse muy grande, además de una solución que a priori resultó no tener una lógica evidente; por esto se decidió aumentar el tiempo de ejecución del solver para cada conjunto de datos a 450 segundos, con la excepción del análisis de sensibilidad para la variación del costo de transporte, que se ejecutó durante 1800 segundos.

4.7.1. Variación del costo unitario de procesamiento en los nodos origen

El primer parámetro que se analizó fue el costo unitario de procesamiento de madera en cada nodo origen c_i . Dicho parámetro se aumentó en un 15% y se disminuyó en la misma magnitud respecto del inicial establecido en la [sección 4.4](#). Lo primero a evaluar es el valor de la función objetivo, se espera que el mismo aumente al aumentar el costo de procesamiento y disminuya al disminuirlo, dado que no se puede evitar cosechar un cierto mínimo que se corresponde con el requerido para satisfacer la demanda. La tabla 4.6 presenta el valor de la función objetivo para las 3 instancias evaluadas.

Por otro lado se observó que la solución alcanzada por el solver, propone

Tabla 4.6: Valor de la función objetivo según la variación en el costo de procesamiento de madera

Variación costo de procesamiento de madera			
Cantidad	15 % menos	Sin variar	15 % más
Función objetivo (USD)	2.281.641.558	2.430.079.922	2.572.518.472

respecto de la [sección 4.4](#), cosechar una parcela más al disminuir el costo de procesamiento por nodo origen, mientras que al aumentarlo aumenta en dos el número de parcelas cosechadas, por lo que se investiga la superficie cosechada en cada instancia. Otro elemento observado es la cantidad de madera almacenada a lo largo de los periodos. La tabla 4.7 resume los principales datos analizados.

Tabla 4.7: Total cosechado y almacenado según variación de costo de procesamiento de madera

Variación costo de procesamiento de madera			
Cantidad	15 % menos	Sin variar	15 % más
Total cosechado (ha)	71.600	69.900	71.900
Total almacenado (m ³)	1.111.290	1.349.290	3.165.290

De manera de poder entender la lógica de estos resultados se presenta en la tabla 4.8 el MIP-gap entre el valor obtenido y la mejor solución que podría llegar a encontrarse para las distintas instancias.

Tabla 4.8: MIP gap según variación de costo de procesamiento de madera

Variación costo de procesamiento de madera			
Cantidad	15 % menos	Sin variar	15 % más
MIP-Gap	0,7 %	1,3 %	1,8 %

Con esta diferencia porcentual del MIP gap , se entiende que la solución alcanzada más lejana de la mejor que se podría alcanzar, se da en el conjunto de datos con el costo de procesamiento aumentado 15 % con respecto a la [sección 4.4](#) y ello debe impactar por ejemplo en la cantidad de hectáreas cosechadas. Otro punto a tener en cuenta es que se evaluó la cantidad de hectáreas cosechadas y no los m³ lo que podría cambiar la conclusión del total cosechado.

4.7.2. Variación del costo unitario de almacenamiento en los nodos de salida

El segundo parámetro modificado fue el costo unitario de almacenamiento de madera en cada nodo de salida para cada periodo h_{jt} . El mismo se aumentó y disminuyó en un 20 % respecto a lo establecido en la [sección 4.4](#). Tanto para la variación al alza como para la modificación a la baja del parámetro mencionado, el valor del costo total hallado aumentó con respecto al caso original.

En primera instancia, para el caso de un aumento en el costo de almacenamiento sería lógico lo mencionado anteriormente, no así para el caso donde se disminuye dicho costo. Esto se explica a partir del MIP-gap de las soluciones, el detalle de los valores de la función objetivo y el comportamiento de la diferencia porcentual entre la mejor solución posible y la solución hallada con la variación del tiempo de ejecución, se exponen en las tablas 4.9 y 4.10.

Tabla 4.9: Valor de la función objetivo según variación en el costo unitario de almacenamiento

Variación del costo unitario de almacenamiento			
Cantidad	20 % menos	Sin variar	20 % más
Función objetivo (USD)	2.456.592.913	2.430.079.922	2.447.737.587

Tabla 4.10: Valores de MIP gap según tiempo de ejecución y costo unitario de almacenamiento

Tiempo de ejecución (s)	Variación del costo unitario de almacenamiento		
	20 % Menos	Sin variar	20 % más
180	-	2,1	-
200	2,4	2,1	2,6
450	2,4	2,1	2,0

Se puede apreciar que el MIP gap para cuando se disminuye un 20 % el costo de almacenamiento, no varía al aumentar el tiempo de ejecución. Si se logra reducir el MIP-gap para el caso de un aumento en el costo.

En cuanto a lo que se refiere al almacenamiento de la madera, los nodos de salida y la superficie cosechada, los datos obtenidos y procesados se presentan

en la siguiente tabla 4.11.

Tabla 4.11: Total cosechado y almacenado según variación de costo de almacenamiento

Variación del costo unitario de almacenamiento			
Cantidad	20 % menos	Sin variar	20 % más
Total cosechado (ha)	72.400	69.900	71.900
Total almacenado (m ³)	5.239.290	1.349.290	3.385.290

Analizando los datos de la anterior tabla, en ambos escenarios se produce un aumento en el área cosechada y el volumen de madera almacenada en los nodos de salida. Esto se debe a que en ambos casos se cosecha una mayor Superficie. Como es de esperar ante esta situación, de los dos escenarios generados para este análisis se almacenó mayor cantidad de madera en el de menor costo unitario de almacenamiento.

4.7.3. Variación del costo unitario unitario de transporte

Por último, se modificó un tercer parámetro del problema, el costo unitario de transporte de madera asociado a los arcos de la red de transporte, a_{ij} . Para este caso, se ejecutó la instancia de la [sección 4.2](#) y dos variaciones de la misma con un tiempo límite de 1800 segundos, con dicho tiempo, el MIP gap en las tres situaciones se situó en 1,2 %. Previamente fue evaluada la solución con un límite de tiempo de 200 y 450 segundos, encontrando que la diferencia porcentual entre el valor obtenido y la mejor solución que podría llegar a obtenerse era mayor al 2 %. Buscando mejorar este valor para realizar un mejor análisis se definió el tiempo mencionado previamente.

Intuitivamente, una modificación en el costo de transporte se traduciría directamente en un impacto en el flujo de madera total que arroje la solución. Debido a esto se decide comparar; además de los valores objetivo, el volumen almacenado y la superficie cosechada; el flujo total de madera en m³.

Todos los datos mencionados se presentan en las tablas 4.12 y 4.13.

Tabla 4.12: Flujo, cosecha y volumen almacenado según variación de costo unitario de transporte.

Variación costo unitario de transporte			
Cantidad	20 % menos	Sin variar	20 % más
Total cosechado (ha)	71.600	69.900	71.400
Total almacenado (m ³)	1.692.290	1.349.290	2.056.290
Flujo (m ³)	130.275.000	124.006.000	123.067.000

Tabla 4.13: Valor de la función objetivo según variación de costo unitario de transporte

Variación del costo unitario de transporte			
Cantidad	20 % menos	Sin variar	20 % más
Función objetivo (USD)	2.115.356.752	2.430.079.922	2.732.109.633

Como primer comentario, es notorio que el costo de transporte es el parámetro que más impacta al valor de la función objetivo y que lo hace en relación directa: cuanto mayor es el costo de transporte, mayor es el costo global de la solución. Esto era lo esperable cuando se realizó el relevamiento de los datos en base a escenarios reales, para el problema integrado de la cosecha forestal, el costo de transporte es el de mayor magnitud.

Realizando un análisis más minucioso, se observa que la idea intuitiva de una relación inversa entre el flujo de madera y el parámetro que se varía en esta oportunidad es correcta. El flujo sigue la tendencia contraria al valor de la función objetivo. Por otra parte, las superficies cosechadas no presentan mayores diferencias en los tres casos, no así el total almacenado, el cual también tiene un comportamiento razonable, a saber: en el caso que el costo de transporte baja, fluye una mayor cantidad de madera por la red, esto eleva la cantidad de almacenamiento, ya que la demanda sigue siendo la misma que en la instancia original. En el caso que el costo de transporte sube, se da un compromiso entre el transporte y el almacenamiento. En otras palabras, se almacena una mayor cantidad de madera para tener menor necesidad de transporte de la misma. Esta instancia tiene un comportamiento inverso a aquella en la cual se disminuye el costo de almacenamiento.

Por último se menciona que el costo de procesamiento en cada nodo origen varía por cada uno de estos, esto puede generar que la solución propuesta,

considera cosechar parcelas más cercanas a los nodos salida, las cuales tienen mayor superficie o similar y son más costosas de procesar, pero recorren menos arcos, lo que puede disminuir el total de flujo en la red y por tanto los costos asociados al transporte, manteniendo prácticamente constante el volumen cosechado.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se sintetizan las impresiones finales sobre el trabajo realizado.

Como primer conclusión sobre el trabajo se destaca el cumplimiento del objetivo principal del mismo, definido en la [sección 3.2](#) como: “*generar un modelo que minimice los costos asociados a la gestión forestal, mientras que al mismo tiempo, cumple con las restricciones existentes del problema*”. El modelo desarrollado encontró soluciones satisfactorias para los diferentes escenarios suministrados en los conjuntos de datos utilizados, siendo coherentes también los resultados arrojados en los análisis de sensibilidad realizados.

Se abordó el problema de la planificación táctica de la cosecha forestal, pudiendo decidir qué parcela cosechar en qué período, de acuerdo a la demanda establecida y logrando minimizar los costos asociados. El modelo obtenido permite ser adecuado para una configuración determinada, donde insertando la distribución de los plantíos y la distribución de carreteras al configurar la red, se podría obtener datos acerca de el mínimo costo de cosecha y el flujo de madera por período, que se establecería de manera óptima para satisfacer la demanda. Estos datos permitirían medir el impacto en el flujo de carreteras por período y apoyarían la toma de decisiones viales.

En lo que respecta a la investigación de antecedentes para este proyecto, se realizó una extensa revisión del estado del arte a través de diferentes trabajos relacionados en el área de estudio, que permitieron comprender cabalmente el

desarrollo de la misma a lo largo de la historia, así como identificar los principales aportes de diferentes autores importantes asociados.

Siguiendo con el análisis del cumplimiento de los objetivos secundarios, se logró utilizar datos disponibles de actores públicos y privados de nuestro país para crear un marco de referencia que permitiese cargar los diferentes conjuntos de datos utilizados.

Por otra parte, destacamos el proceso de aprendizaje que supuso realizar un resumen del estado de situación global, regional y nacional de las dos áreas principales que forman el problema de la cosecha forestal: el sector silvícola y el de transporte. El equipo tomó contacto a partir de este trabajo con varias fuentes valiosas de información, tanto por el volumen de datos que estas engloban como por el interés de los tópicos mencionados. En particular, se destacan dos fuentes principales de información: la base de datos de la FAO, que cuenta con datos acumulados anuales de la producción y venta de productos madereros para todos los países miembros de las Naciones Unidas y el informe de la competitividad global del año 2019 del Foro Económico Mundial, del que se extrajeron datos sobre la infraestructura de transporte de la región y el mundo.

En particular, se valora el conocimiento adquirido durante el recabado de información acerca de la industria forestal, el conocimiento de los productos que forman parte de la misma y su importancia en la economía global. Además del cumplimiento del objetivo planteado, el aprendizaje obtenido es otro aspecto a destacar en las conclusiones.

Más allá de los aspectos destacables de lo logrado, existen limitaciones y oportunidades de mejora y/o ampliación del alcance del trabajo. En particular, la realidad de lo que sucede en la industria de la planificación de la cosecha forestal es mucho más vasta de lo que se abordó en el presente trabajo, ya que en el mismo se partió de la base de una serie de hipótesis que reducen la complejidad del mismo.

Lo más destacable a este respecto es que no se considera en el modelo que las áreas cosechadas pueden volver a plantarse de nuevo durante el horizonte de planificación planteado, ni la variabilidad en el rendimiento de las mismas

(si bien se considera la demanda por período, esto busca reflejar el crecimiento que tiene el rendimiento a medida que un árbol transita su proceso de maduración. Sin embargo, se considera al rendimiento como un parámetro dado para cada período y no como una variable aleatoria, a esto se hace referencia cuando se dice que no se considera la variabilidad en el rendimiento). A los plantíos que las empresas tienen en sus arcas, se les monitorea año a año su rendimiento por hectarea. Con este tipo de monitoreo, se pueden trazar proyecciones sobre como será el rendimiento de dichos plantíos en el futuro. A nivel computacional, se podría modelar el rendimiento como una variable aleatoria y generar un modelo estocástico.

Dada la variabilidad de la genética de las plantas y inferencias climáticas, algunos plantíos pueden llegar al máximo de su rendimiento antes que otros. Esto no se ve reflejado en un parámetro de rendimiento con crecimiento constante para todas las parcelas a lo largo del horizonte de planificación, como el utilizado en el modelo realizado.

Mediante el seguimiento del rendimiento de éstos plantíos, se toman decisiones como cosechar el plantío si el mismo ya se prevee que su rendimiento no va a ser el esperado y replantar una nueva camada con el objetivo de que la misma tenga mejores rendimientos.

Por otra parte, se puede realizar un razonamiento análogo en lo que respecta a la demanda por período. Una oportunidad de expansión de este trabajo es generar un modelo donde la demanda por período sea incierta (una variable aleatoria), generando también un modelo estocástico a partir de ella. Las cuestiones mencionadas anteriormente podría ser un aspecto para introducir en modelos futuros.

Finalmente, un hincapié aún mayor que el realizado en este proyecto en la sostenibilidad puede resultar en un interesante desafío como trabajo futuro, tanto en el aspecto ambiental como en el laboral (para este último aspecto se requeriría abarcar horizontes de planificación menores, de índole operativa).

Es sabido que en estos dos campos es donde la industria presenta sus mayores problemáticas, debido a su pertenencia con el alcance del trabajo la problemática ambiental fue oportunamente presentada. En lo que respecta a

lo laboral, la situación en la industria a nivel mundial es peor que la media comparándose con otras, particularmente los aspectos de sanidad y seguridad laboral son los más preocupantes ¹. En el apéndice de este trabajo puede encontrarse un análisis más detallado a este respecto así como también uno de las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del proyecto en general una vez culminado.

¹<http://www.fao.org/3/XII/MS8-S.htm>

Bibliografía

- [1] G. Daniluk. *Introducción a la cosecha*. tech. rep. Montevideo, Uruguay: Facultad de Agronomía, UdelaR, 2004.
- [2] JM. Torres; A. Fossati. “Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina Documento de Trabajo - Informe Nacional Uruguay”. En: *Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Roma, 2004. Cap. 4.
- [3] FAO; ”Forest resources assessment” . “Situación de los bosques en el mundo”. En: <http://www.fao.org/docrep/pdf/011/i0350s/i0350s02.pdf>. Roma, 2009. Cap. PARTE 2.
- [4] FAO; ”Forest resources assessment” . <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/es>. Último acceso: Domingo 22 de Noviembre de 2020.
- [5] K Schwab. *The Global Competitiveness Report*. 91-93 route de la Capite CH-1223 Cologny/Geneva Switzerland: World Economic Forum, 2019.
- [6] FAO; ”Forest resources assessment” . *El estado de los bosques y el sector forestal en la región*. tech. rep. <http://www.fao.org/3/bt191s/bt191s.pdf>. Tegucigalpa, Honduras, 2017.
- [7] M. Boscana; L. Boragno. *Estadísticas Forestales 2020*. Dirección General Forestal - MGAP, Marzo 2020.
- [8] UNIT-ISO. *Sistemas de gestión de la calidad ISO 9000*. Montevideo Uruguay: Introducción, 2015.
- [9] Uruguay XXI. *Oportunidades de inversión SECTOR FORESTAL*. Montevideo Uruguay, 2018.
- [10] E. Artuccio. *Elementos de gestión logística*. tech. rep. Montevideo, Uruguay: Facultad de Ingeniería, UdelaR, 2019.

- [11] D. Navon A. Weintraub. “A Forest Management Planning Model Integrating Silvicultural and Transportation Activities”. En: *Management Science* 12 (1976), pp. 1299-1309.
- [12] N. Andalaft; P. Andalaft; M. Guignard A. Magendzo; A. Wainer; A. Weintraub. “Problem of Forest Harvesting and Road Building Solved through Model Strengthening and Lagrangean Relaxation”. En: *Operations Research* 4 (2003), pp. 613-628.
- [13] P. Flisberg; M. Friskaand; M. Ronnqvist. “Integrated harvest and logistic planning including road upgrading”. En: *Scandinavian Journal of Forest Research* 29(1) (2014), pp. 195-209.
- [14] M. Henningsson; J. Karlsson; M. Rönqvist. “Optimization models for forest road upgrade planning”. En: *Math Model Algorithm* 6 (2007), pp. 3-23.
- [15] J. Troncoso; S. D’Amours; P. Flisberg; M. Rönqvist; A. Weintraub. “A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain — a case study in the Chilean forest industry”. En: *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 45 Issue 7 (2015), pp. 937-949.
- [16] P.A.V.H. dos Santos; A.C.L. da Silva; J.E. Arce; A.L.D. Augustynczik. “A Mathematical Model for the Integrated Optimization of Harvest and Transport Scheduling of Forest Products”. En: (2019).
- [17] A.V. Moura; R.A. Scaraficci. “Hybrid Heuristic Strategies for Planning and Scheduling Forest Harvest and Transportation Activities”. En: *IEEE International Conference* 11th (2008), pp. 447-454.
- [18] A.L. Derci Augustynczik; J.E Arce; A.C. L. da Silva. “Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais”. En: *CER-NE* vol. 21, núm. 4 (2015), pp. 649-656.
- [19] J. Kašpar; R. Marušák; R. Hlavatý. “A Forest Planning Approach with Respect to the Creation of Overmature Reserved Areas in Managed Forests”. En: *Forests* 6 (2015), pp. 328-343.
- [20] N. Naderializadeh; K.A. Crowe. “The effect of the density of candidate roads on solutions in tactical forest planning”. En: *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 48 Issue 6 (2018), pp. 679-688.

- [21] F. Sarrazin; L. Lebel; N. Lehoux. “Analyzing the impact of implementing a logistics center for a complex forest network”. En: *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 49 Issue 2 (2019), pp. 179-189.
- [22] J. Sessions;K. Boston;R. Hill; R.Stewart. “Log sorting location decisions under uncertainty”. En: (2005), pp. 53-57.
- [23] T. Chan; J. Cordeau; G. Laporte. “Locating satellite yards in forestry operations”. En: *NFOR* (2009), pp. 223-234.
- [24] Montes del plata. *Resumen de gestión forestal*. tech. rep. Uruguay, 2019.
- [25] Montes del plata. *Plan de manejo forestal y monitoreos grupo de certificación Montes del Plata*. tech. rep. Uruguay, 2019.
- [26] C. A. Devia. *Valoración de la madera en pie. Una alternativa para el manejo adecuado de los recursos forestales*. tech. rep. Quebec City, Canadá, 2017.
- [27] Ministerio de Transporte y Obras Públicas. *Precios de referencia*. tech. rep. Montevideo, Uruguay, 2015.

APÉNDICES

Apéndice 1

Código GNU MathProg del Modelo Matemático

```
/*CONJUNTOS */

set T;
/* Conjunto de periodos */

set N;
/*Conjunto de Nodos de la red */

set No within N;
/*Nodos origen de la madera en la cosecha */

set Ni within N;
/*Nodos interseccion en la red de transporte */

set Ns within N;
/*Nodos salida de la madera del plantio */

set P;
/*Parcelas */

set Pc{P} within P;
/*Parcelas contiguas a una parcela*/
```

set Pa{No} within P;
/*Parcelas adyacentes a un nodo origen */

set A within {i in N, j in N: i <> j};
/*Arcos de la red */

set Ae within A;
/*Arcos existentes en la red */

set Ap within A;
/*Arcos potenciales de la red */

/*PARAMETROS */

param d {t in T} >= 0;
/*Demanda en el periodo t */

param o {t in T} >= 0;
/*Madera maxima que se puede cosechar en el periodo t */

param s {p in P} >= 0;
/*Superficie plantada de la parcela p */

param r {p in P, t in T} >= 0;
/*Rendimiento de la parcela p, en el periodo t */

param c {i in No} >= 0;
/*Costo unitario de procesamiento de madera en cada nodo origen */

param a {(i,j) in A} >= 0;
/*Costo unitario de transporte de madera asociado al arco (i,j)*/

param u {(i,j) in A, t in T} >= 0;
/*Capacidad del arco (i,j) en el periodo t*/

```

    param b {(i,j) in Ap} >= 0;
/*Costo de construccion del arco potencial (i,j)*/

    param q >= 0;
/*Tasa de descuento*/

    param g {t in T} >= 0;
/*Presupuesto disponible de construccion de arcos segun el periodo t*/

    param z0 {j in Ns} >= 0;
/*Inventario de madera en el periodo inicial t=0 */

    param h {j in Ns, t in T} >= 0;
/*Costo unitario de almacenamiento de madera segun nodo de salida y periodo*/

    param k {j in Ns} >= 0;
/*Capacidad de inventario segun de salida*/

/* VARIABLES DE DECISION */

    var x {p in P, t in T}, binary;
/* 1 Si se decide cosechar la totalidad de la parcela p en el periodo, 0 en otro caso*/

    var y {(i,j) in Ap, t in T}, binary;
/*1 Si se decide construir el arco potencial (i,j) en el periodo t, 0 en otro caso*/

    var f {(i,j) in A, t in T} >= 0;
/* Flujo (en m3) en el arco (i,j) en el periodo t*/

    var z {j in Ns, t in T union {0}} >= 0;
/*inventario total de madera en nodos de salida (en m3), en el periodo t*/

    var w {j in Ns, t in T} >= 0;

```

/*Abastecimiento de la demanda según período y nodo destino*/

/* FUNCION OBJETIVO */

minimize costo: $\sum \{t \text{ in } T\} (1/(1+q)^t) * (\sum \{j \text{ in } Ns\} h[j, t] * z[j, t] + \sum \{i \text{ in } No, p \text{ in } Pa[i]\} s[p] * r[p, t] * c[i] * x[p, t] + \sum \{(i, j) \text{ in } A\} (a[i, j] * f[i, j, t]) + \sum \{(i, j) \text{ in } Ap\} b[i, j] * y[i, j, t]);$

/*RESTRiCCIONES */

/* 1 */

s.t. Satisfaccion_demanda $\{t \text{ in } T, j \text{ in } Ns\}$: $\sum \{(i, j) \text{ in } A\} f[i, j, t] + z[j, t-1] = w[j, t] + z[j, t];$

/* 2 */

s.t. Asignacion_inventario_Ns $\{t \text{ in } T\}$: $d[t] = \sum \{j \text{ in } Ns\} w[j, t];$

/* 3 */

s.t. inventario_inicial $\{j \text{ in } Ns\}$: $z[j, 0] = z0[j];$

/* 4 */

s.t. Balance_flujo $\{t \text{ in } T, j \text{ in } Ni\}$: $\sum \{(i, j) \text{ in } A\} f[i, j, t] = \sum \{(j, i) \text{ in } A\} f[j, i, t];$

/* 5 */

s.t. Balance_nodo_origen $\{t \text{ in } T, i \text{ in } No\}$: $\sum \{(i, j) \text{ in } A\} f[i, j, t] = \sum \{p \text{ in } Pa[i]\} s[p] * r[p, t] * x[p, t];$

/* 6 */

s.t. Capacidad_arcos $\{t \text{ in } T, (i, j) \text{ in } Ae\}$: $f[i, j, t] \leq u[i, j, t];$

/* 7 */

s.t. Capacidad_inventario $\{t \text{ in } T, j \text{ in } Ns\}$: $z[j, t] \leq k[j];$

/* 8 */

s.t. Unicidad_constr_ap $\{(i, j) \text{ in } Ap\}$: $\sum \{t \text{ in } T\} y[i, j, t] \leq 1;$

/* 9 */

s.t. Construcccion_arco_pot $\{t \text{ in } T, (i,j) \text{ in } Ap\}$: $f[i,j,t] \leq u[i,j,t] * \sum\{tp \text{ in } (1..t)\} y[i,j,tp]$;

/* 10 */

s.t. Contiguidad $\{t \text{ in } T, p \text{ in } P, l \text{ in } Pc[p]\}$: $x[p,t] + x[l,t] \leq 1$;

/* 11 */

s.t. Cosecha_parcela_1periodo $\{p \text{ in } P\}$: $\sum\{t \text{ in } T\} x[p,t] \leq 1$;

/* 12 */

s.t. Max_Cosecha $\{t \text{ in } T\}$: $\sum\{p \text{ in } P\} s[p] * r[p,t] * x[p,t] \leq o[t]$;

/* 13 */

s.t. Presupuesto_construccion $\{t \text{ in } T\}$: $\sum\{(i,j) \text{ in } Ap\} b[i,j]*y[i,j,t] \leq g[t]$;

Apéndice 2

Datos procesados

Para la consulta de los datos procesados, el equipo de trabajo habilita el acceso a la carpeta donde se almacenan ¹

¹[Carpeta de Datos compartida](#)

Apéndice 3

Análisis de partes blandas

Este apéndice tiene por objetivo incorporar elementos analizados a lo largo del proyecto que tienen especial énfasis en elementos como por ejemplo la gestión de la fuerza laboral y la consideración de las capacidades de la misma.

3.1. Capacidad de recursos humanos

Se considera relevante la mención de temas importantes relativos a la industria forestal como la consideración de la productividad por recurso humano, normas legales y aspectos vinculados a la seguridad laboral. En primera instancia se recuerda que el modelo trata la planificación de la cosecha forestal a mediano plazo; como se mencionó anteriormente, con un horizonte promedio de 10 años es posible generar planes de cosecha que establezcan anualmente que parcelas cosechar, qué cantidad de madera fluye por los arcos y qué cantidad es necesario almacenar, entre otros.

Este apoyo a la toma de decisiones brinda elementos suficientes para decidir acerca de recursos a asignar, impacto en variaciones de costos y elementos no utilizados; se puede concluir que no establece o no contempla la capacidad de producción de un empleado de una organización o si existe sobrecarga de trabajo sobre ellos. Esto se debe al horizonte de planificación, el cual no es operativo, lo que lleva a que para darle tratamiento a estos temas se deba considerar capacidades operativas de un cierto personal y, por ejemplo, restringir la cosecha máxima por período por ésta capacidad, o establecer un flujo máximo de madera por arcos que sea representativo de la productividad de dos turnos de 8 horas de una plantilla determinada de conductores y así tomar en

cuenta dicha sobrecarga sobre los recursos humanos. Algo similar ocurre con la seguridad y salud ocupacional y/o normas legales aplicables, las cuales para darle un tratamiento adecuado y contemplar dichos aspectos en el modelo, es necesario generar uno nuevo que atienda la planificación a nivel operativo, ya que con las medidas presentadas anteriormente, podría aún existir picos de demanda de capacidad en sobrecarga en algunos momentos y menor demanda a la determinada como media en otros, debido a la naturaleza del sistema involucrado en el proyecto.

A continuación se muestran aspectos laborales que podrían ser tratados en un modelo operativo:

- Seguridad
- Sanidad
- Continuidad del empleo
- Dialogo social
- Prácticas que violan convenios de la OIT como eliminación del trabajo forzoso, abolición del trabajo infantil, etc.

3.1.1. Análisis FODA del proyecto

Se generó un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del proyecto una vez culminado y se presenta a continuación.

- **Fortalezas:**

Flexibilidad y adaptabilidad del modelo: se entiende que el mismo, al no ser generado en base a un caso de estudio real, tiene la capacidad de poder configurarse desde un principio con elementos de cualquier realidad determinada. A su vez tiene un potencial adaptable para considerar ciertos aspectos dentro del mismo que pertenezcan a la misma línea de alcance. Esto significa que por ejemplo se puede incluir en el modelo otro tipo de vía de transporte como la ferroviaria.

Aspectos considerados: Se entiende que la cantidad de aspectos considerados en el modelo, pueden brindar un gran apoyo a la toma de decisiones debido a la integración de los problemas silvícola y de transporte.

- **Debilidades:**

Aspectos no considerados: Debido a los elementos no considerados como la dimensión de la capacidad de la fuerza laboral involucrada, se deduce que los mismos podrían llegar a contemplarse en una aplicación del modelo a un caso específico mediante el uso efectivo de restricciones que permitan respresentar dichos elementos.

Sin caso de estudio real: Este punto hace alusión al hecho de que el modelo si bien fue sometido a casos de estudios generados a partir de datos tomados de actores públicos y privados, no corresponde a la aplicación propiamente dicha a un caso concreto y por ende no se pudo determinar si los resultados obtenidos son satisfactorios para un tomador de decisiones en particular.

- **Oportunidades:**

Consideración de nuevos requerimientos: Dada la flexibilidad del modelo mencionada anteriormente, se entiende que podrían contemplarse requerimientos particulares de una cierta realidad generando nuevas restricciones y si fuera necesario variables de decisión y modificaciones en la función objetivo.

Adaptabilidad a normas: En el hipotético caso que surgieran nuevas normas o se le pretenda dar tratamiento con el modelo podrían representarse en él como se mencionó en el punto anterior. Normas vinculadas a cantidad máxima de producción, flujos máximos por carreteras, carreteras permitidas para flujos extensos de madera etc.

- **Amenazas:**

Falta de apoyo de líderes de la industria: La falta de apoyo por parte de actores relevantes de la industria forestal se entiende como una amenaza debido a que ellos son quienes toman decisiones y quienes debieran estar de acuerdo en tomar como insumos para la misma los resultados de un modelo matemático.

Acceso a dirección de industria: Empresas importantes en el sector forestal uruguayo son extranjeras lo que puede entenderse como una dificultad el acceso a las mismas para que de alguna manera se considere el modelo como una herramienta.