



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA BAJO INCERTIDUMBRE DE UN MODELO DE
PLANIFICACIÓN FORESTAL INTEGRADO USANDO ESTRATEGIAS DE
DECOMPOSICIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

NICOLÁS ALEJANDRO FERNÁNDEZ ALISTE

PROFESOR GUÍA:
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FERNANDO ORDÓÑEZ PIZARRO
JUAN PABLO CAVADA HERRERA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL
POR: NICOLÁS ALEJANDRO FERNÁNDEZ ALISTE
FECHA: 2020
PROF. GUÍA: ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA BAJO INCERTIDUMBRE DE UN MODELO DE PLANIFICACIÓN FORESTAL INTEGRADO USANDO ESTRATEGIAS DE DECOMPOSICIÓN

El trabajo desarrollado en esta memoria se enmarca en el área de investigación de operaciones, en el campo de la optimización estocástica para un problema de planificación forestal, el cual se modela como un problema lineal de carácter mixto.

El problema de planificación forestal abordado en esta tesis consiste en la maximización del valor presente del plan de explotación táctico siguiendo una estrategia integrada de la producción a nivel bosque y a nivel industrial, incorporando incertidumbre en los precios de Pulpa, el cual corresponde al producto que aporta el mayor porcentaje de la utilidad en la industria, además de ser un commodity. Esta incertidumbre se representa mediante árboles de escenarios.

Dentro de las decisiones a tomar en consideración, el problema abarca la planificación de la cosecha de bosques, el transporte a distintas plantas productivas (aserraderos, plantas de Pulpa y plantas de Electricidad), la planificación de la producción para la venta de productos y co-productos reutilizados para la producción de pulpa y electricidad.

Abordar este tipo de problema de optimización mediante técnicas tradicionales se vuelve inabordable en la medida que el tamaño de la instancia va creciendo, lo que justifica la utilización de un algoritmo adecuado para alcanzar resultados en tiempos razonables. Tras experimentar con heurísticas de descomposición, en particular Progressive Hedging, la metodología propuesta para la resolución de este problema es la planificación mediante rodales dinámicos, que utiliza la relajación lineal del problema entero mixto para modelar una estrategia en la cual el programa entrega un porcentaje del bosque de una edad determinada a ser cosechado en cada periodo.

Se utiliza una metodología de generación de árboles de escenarios basada en un modelo financiero E-GARCH, utilizado para predecir las volatilidades implícitas de activos que se transan en el mercado financiero (debido a que la Pulpa es un commodity, utilizando como punto de partida la simulación de volatilidades en los periodos deseados, se predice el precio promedio para un porcentaje de las simulaciones, lo que representa un estado del sistema en cada periodo. Incorporando esta técnica se realiza una serie de experimentos de calibración para los parámetros del algoritmo.

Finalmente se analiza los resultados bajo tres niveles de descuento y para tres instancias de escenarios de precio con características distintas, con el fin de comparar las decisiones y utilidad esperada del problema estocástico con el problema original.

Para Lukitas y Max, los adictos a los abazos.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Profesor Weintraub, por su excelencia como docente y su dedicación como mentor. A Juan Pablo, por acompañarme y siempre devolverme el ánimo cuando fue necesario. Y en especial a mi familia y amigos por una década de apoyo incondicional.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Investigación de Operaciones en la Industria Forestal	1
1.2. Planificación Forestal	2
1.2.1. Consumo Industrial de Madera	3
1.3. Objetivos de Investigación	4
2. Marco Teórico	6
2.1. Problema de Planificación Estocástico Entero Mixto	7
2.1.1. Principio de No-Anticipatividad	8
2.1.2. Árboles de Escenarios	8
2.2. Generación de Escenarios de Precios de Pulpa	10
2.2.1. Modelo Browniano Generalizado	11
2.2.2. Modelo EGARCH	11
2.3. Planificación Forestal Integrada	12
2.3.1. Cadena de Producción Forestal Integrada	12
3. Formulación Matemática del Problema de Optimización Estocástico Mixto	16
3.1. Sets de Índices	16
3.2. Parámetros	17
3.3. Variables de Decisión	19
3.4. Función Objetivo	19
3.5. Restricciones	21
4. Resolución del Problema Estocástico	26
4.1. Python Optimization Modeling Objects (PYOMO)	26
4.2. Módulo PYSP	26
4.3. Implementación	28
4.3.1. Simulación de Bosque Tipo	28
4.3.2. Simulación de Escenarios de Precio	28
4.4. Uso de la Relajación Lineal	31
5. Resultados	33
5.1. Utilidad Esperada	33
5.2. Ingresos por Venta versus Costes	36
5.3. Destino de trozos bajo cada instancia	39
6. Conclusión	42

Bibliografía	45
Apéndices	47
A. Resumen de precios posibles en Instancias	47
A.1. Valores de precios en Instancia 1	47
A.2. Valores de precios en Instancia 2	48
A.3. Valores de precios en Instancia 3	49
B. Heurística Progressive Hedging	50
B.1. Progressive Hedging (PH)	50
B.1.1. Función Objetivo	50
B.1.2. Algoritmo utilizado en PH	52
C. Resultados de optimizar el problema determinista (PD), bajo distintos factores de descuento	53
C.1. Resultados para Factor de descuento 1%	54
C.1.1. Parte 1: Horizonte de planificación de Negocio (\$USD)	54
C.1.2. Parte 2: Horizonte de planificación de Anticipación (\$USD)	55
C.2. Resultados para Factor de descuento 4%	56
C.2.1. Parte 1: Horizonte de planificación de Negocio (\$USD)	56
C.2.2. Parte 2: Horizonte de planificación de Anticipación (\$USD)	57
C.3. Resultados para Factor de descuento 8%	58
C.3.1. Parte 1: Horizonte de planificación de Negocio (\$USD)	58
C.3.2. Parte 2: Horizonte de planificación de Anticipación (\$USD)	59
D. Resultados detallados de costes e ingresos para las instancias del problema Estocástico	60
D.1. Resultados para Instancia 1	61
D.1.1. Parte 1: Resultados bajo factor de descuento 1%	61
D.1.2. Parte 2: Resultados bajo factor de descuento 4%	62
D.1.3. Parte 1: Resultado bajo factor de descuento 8%	63
D.2. Resultados para Instancia 2	64
D.2.1. Parte 1: Resultados bajo factor de descuento 1%	64
D.2.2. Parte 2: Resultados bajo factor de descuento 4%	65
D.2.3. Parte 1: Resultado bajo factor de descuento 8%	66
D.3. Resultados para Instancia 3	67
D.3.1. Parte 1: Resultados bajo factor de descuento 1%	67
D.3.2. Parte 2: Resultados bajo factor de descuento 4%	68
D.3.3. Parte 1: Resultado bajo factor de descuento 8%	69
E. Resultados detallados de cosecha para las instancias del problema Estocástico	70
E.1. Resultados para Instancia 1	71
E.1.1. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 1%	71
E.1.2. Parte 2: Uso de madera bajo factor de descuento 4%	72
E.1.3. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 8%	73
E.2. Resultados para Instancia 2	74

E.2.1. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 1 %	74
E.2.2. Parte 2: Uso de madera bajo factor de descuento 4 %	75
E.2.3. Parte 3: Uso de madera bajo factor de descuento 8 %	76
E.3. Resultados para Instancia 3	77
E.3.1. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 1 %	77
E.3.2. Parte 2: Uso de madera bajo factor de descuento 4 %	78
E.3.3. Parte 3: Uso de madera bajo factor de descuento 8 %	79
F. Resumen de volumen cosechado	80
F.1. Cosecha en Instancia 1, Factor de descuento de 1 %	80
F.2. Cosecha en Instancia 1, Factor de descuento de 4 %	80
F.3. Cosecha en Instancia 1, Factor de descuento de 8 %	81
F.4. Cosecha en Instancia 2, Factor de descuento de 1 %	81
F.5. Cosecha en Instancia 2, Factor de descuento de 4 %	81
F.6. Cosecha en Instancia 2, Factor de descuento de 8 %	82
F.7. Cosecha en Instancia 3, Factor de descuento de 1 %	82
F.8. Cosecha en Instancia 3, Factor de descuento de 4 %	82
F.9. Cosecha en Instancia 3, Factor de descuento de 8 %	83

Índice de Tablas

5.1. Utilidad esperada para el Problema Determinista	33
5.2. Utilidad esperada para Instancia 1	34
5.3. Utilidad esperada para Instancia 2	34
5.4. Utilidad esperada para Instancia 3	34
A.1. Precios de Pulpa simulados en cada etapa de la Instancia 1	47
A.2. Precios de Pulpa simulados en cada etapa de la Instancia 2	48
A.3. Precios de Pulpa simulados en cada etapa de la Instancia 3	49
F.1. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 1 % en Instancia 1	80
F.2. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 4 % en Instancia 1	80
F.3. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 8 % en Instancia 1	81
F.4. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 1 % en Instancia 2	81
F.5. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 4 % en Instancia 2	81
F.6. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 8 % en Instancia 2	82
F.7. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 1 % en Instancia 3	82
F.8. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 4 % en Instancia 3	82
F.9. Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 8 % en Instancia 3	83

Índice de Ilustraciones

1.1.	Esquema simplificado de la cadena de producción forestal en Chile. Basado en el esquema mostrado en Troncoso et al. [10]	3
1.2.	Flujo de productos de madera, año 2017. Tomado de Anuario Forestal 2018, publicado por INFOR [4]	4
2.1.	Árbol de escenarios junto a su representación como forma extendida.	10
4.1.	Representación gráfica de bosque simulado.	29
4.2.	Ejemplo de simulación de precios de pulpa, con 10.000 trayectorias de precio.	30
5.1.	Incremento en la utilidad esperada de cada instancia estocástica, respecto a las decisiones del PD.	36
5.2.	Resumen resultado para Instancia 1, conteniendo ventas, costes y utilidad.	37
5.3.	Resumen resultado para Instancia 2, conteniendo ventas, costes y utilidad.	38
5.4.	Resumen resultado para Instancia 3, conteniendo ventas, costes y utilidad.	39
5.5.	Matriz de asignación de volumen pulpable para cada grupo de escenarios estudiado, dentro de cada instancia.	40
C.1.	Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 1 %, peiodos del horizonte de planificación de Negocio (T_B)	54
C.2.	Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 1 %, periodos del horizonte de planificación de Anticipación (T_A) y Total en el Horizonte de Planificación (T)	55
C.3.	Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 4 %, peiodos del horizonte de planificación de Negocio (T_B)	56
C.4.	Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 4 %, periodos del horizonte de planificación de Anticipación (T_A) y Total en el Horizonte de Planificación (T)	57
C.5.	Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 8 %, peiodos del horizonte de planificación de Negocio (T_B)	58
C.6.	Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 8 %, periodos del horizonte de planificación de Anticipación (T_A) y Total en el Horizonte de Planificación (T)	59
D.1.	Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 1, factor de descuento al 1 %	61

D.2. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 1, factor de descuento al 4 %	62
D.3. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 1, factor de descuento al 8 %	63
D.4. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 2, factor de descuento al 1 %	64
D.5. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 2, factor de descuento al 4 %	65
D.6. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 2, factor de descuento al 8 %	66
D.7. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 3, factor de descuento al 1 %	67
D.8. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 3, factor de descuento al 4 %	68
D.9. Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 3, factor de descuento al 8 %	69
E.1. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 1, factor de descuento al 1 %	71
E.2. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 1, factor de descuento al 4 %	72
E.3. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 1, factor de descuento al 8 %	73
E.4. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 2, factor de descuento al 1 %	74
E.5. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 2, factor de descuento al 4 %	75
E.6. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 2, factor de descuento al 8 %	76
E.7. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 3, factor de descuento al 1 %	77

E.8. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 3, factor de descuento al 4 %	78
E.9. Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 3, factor de descuento al 8 %	79

Capítulo 1

Introducción

De acuerdo con la Corporación Chilena de la Madera (CORMA) “Chile es uno de los veinte primeros países en producción y comercialización de productos forestales” [3], ocupando el onceavo lugar en producción de *madera en trozas* y décimo lugar en producción de *pulpa de madera*. Según el Instituto Forestal (INFOR), durante el año 2017, la industria forestal chilena aportó aproximadamente 54.000 US\$ millones al comercio exterior en exportaciones forestales (7,8 % de las exportaciones totales) y tiene una participación de \$2.696 miles de millones de pesos chilenos al PIB (1,83 %), sumado a la generación de más de 114 mil empleos [4].

Este trabajo se enmarca en el área de Investigación de Operaciones, que ha jugado un rol importante en asesorar las decisiones tácticas y estratégicas de la industria y políticas públicas en el sector forestal, sin embargo, el estudio de la integración de los distintos componentes de la cadena de producción ha sido mínimo, separando el manejo de bosques, la producción en aserraderos, plantas de pulpa y otras componentes de la industria como actores independientes, según D’Amours, Rönnqvist y Weintraub [1]. Este trabajo de investigación busca profundizar en la planificación de la cadena de valor de la industria cuando esta se encuentra integrada verticalmente, entregando resultados valiosos para industrias como la chilena, en la cual la integración vertical completa es una realidad (casos como Arauco o CMPC).

1.1. Investigación de Operaciones en la Industria Forestal

El ámbito de Investigación de Operaciones en el área forestal se enfoca en los problemas de la cadena de producción de la industria, desde el manejo de bosques hasta la distribución de productos finales al retail (tales como Pulpa, Papel, Tableros e incluso Electricidad). En este trabajo se presenta un modelo simplificado de la cadena de producción forestal, que abarca tres tipos de producto: Productos Aserrables (troncos, tableros y paneles), Pulpa y Electricidad, tal como es estudiado en la revisión bibliográfica [1], el ámbito de Investigación de Operaciones en la industria forestal abarca la toma de decisiones operacionales, tácticas y estratégicas; las cuales pueden abarcar planificación a largo plazo de hasta 100 años.

Las decisiones estratégicas están relacionadas con el uso del bosque (áreas de cosecha,

silvicultura, ubicación, construcción de caminos, etc.) y sus consecuencias socio-económicas (entre las cuales destacan afrontar problemas medioambientales, sustentabilidad forestal, generación de empleo y competitividad a nivel global).

Las decisiones a nivel táctico abarcan decisiones anuales o mensuales que alinean con la planificación estratégica, lidiando con planificación de transporte y cosecha para abastecer a los clientes internos y externos, basado en estimaciones de demanda.

Las decisiones operacionales estudiadas se enfocan en inventarios, producción diaria o semanal y relaciones con clientes. Las técnicas más comúnmente utilizadas son el desarrollo de modelos de programación entera mixta, en los cuales es notable la incorporación de variables binarias para planificación estratégica y táctica. También se han desarrollado distintos modelos económicos, usados para conectar la disponibilidad de recursos con el valor de los productos forestales. Dependiendo del país y la legislación vigente, el manejo de bosques puede ser privado o público, lo que conlleva a que las investigaciones de operaciones forestales sean financiadas tanto por actores del sector público como privado.

1.2. Planificación Forestal

D'Amours identifica tres tipos de decisiones a abordar mediante Investigación de Operaciones: cosecha y transporte, ruteo operacional y amenaza de potenciales incendios forestales [1]. Este trabajo abarca la cosecha, transporte y en forma simplificada el ruteo operacional, en un modelo de planificación forestal que integra estas decisiones en un horizonte de planificación dado. La figura 1.1, muestra de forma simplificada como el análisis de la producción forestal es observado en este trabajo:

- En el bosque, se toman decisiones estratégicas que abarcan el ciclo de vida del bosque, desde la plantación hasta la cosecha. Además, se planifica por periodos, el destino de la madera cosechada, la cual puede ser almacenada en las áreas de cosecha, transportada a aserraderos o plantas de producción de pulpa y electricidad. O bien, la madera puede ser vendida directamente desde el bosque.
- Se define como plantas a aserraderos, plantas de pulpa, generadoras de electricidad y papeleras. Tal como ocurre en el bosque, los productos de esta sección de la cadena de producción pueden permanecer en la empresa, como venta interna o ser distribuidos a otros actores de la industria, como venta externa.
- Finalmente, los productos son distribuidos tanto al retail como a los clientes externos a la (o las) empresas estudiadas en la cadena de valor.

Este trabajo asume la producción de Pulpa, Aserrables y Electricidad como productos finales de la cadena de producción, sin distinguir clientes internos de externos. En este trabajo se utiliza las siguientes definiciones:

- **Rodal:** Unidad de producción del bosque, cada rodal representa un área, en la cual se obtiene madera en trozos, la cual se mide según su volumen estimado.
- **Trozos:** Distintos tipos de troncos obtenidos al cosechar un rodal. En este trabajo se

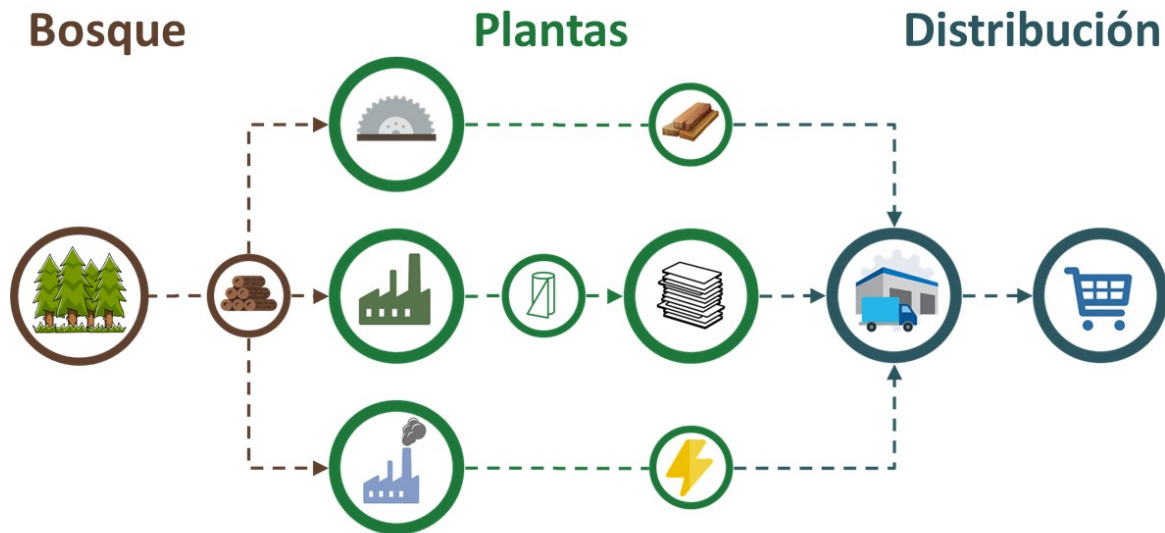


Figura 1.1: Esquema simplificado de la cadena de producción forestal en Chile. Basado en el esquema mostrado en Troncoso et al. [10]

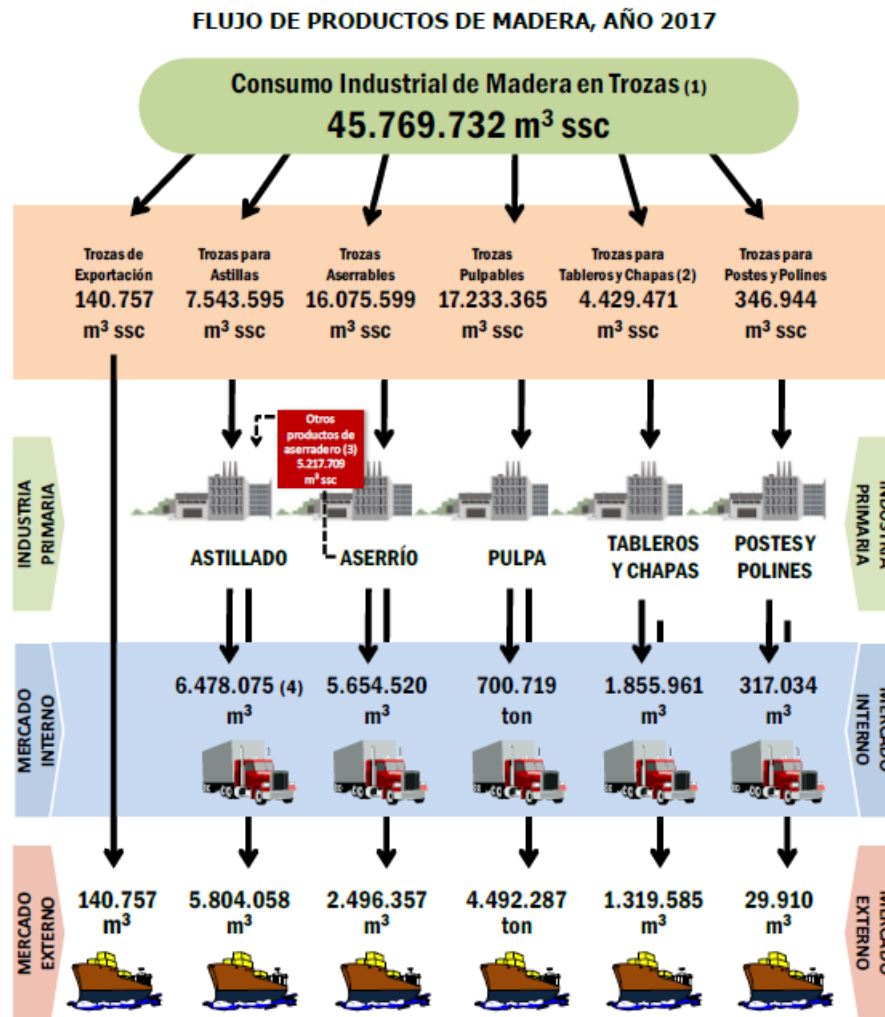
usa el término trozo y tronco para referir a este concepto. Los trozos son identificados según su destino.

- **Co-productos:** Se denota como co-producto al volumen de desecho en un aserradero o planta, que es destinado a ser insumo en otra planta, como astillas y aserrín.
- **Aserrable:** refiere tanto al tipo de trozo destinado a ser procesado en aserraderos, como a los productos obtenidos de ellos.
- **Pulpable:** refiere tanto al tipo de trozo como co-productos aserrables destinados a ser insumos en la producción de celulosa para Pulpa.

D'Amours [1] muestra trabajos previos que estudian partes de la cadena de producción, por ejemplo, la planificación de cosecha y construcción de caminos, otros que abarcan modelos de producción diaria, resolviendo problemas de programación entera y entera mixta, que impactan directamente la reducción de costes de la industria.

1.2.1. Consumo Industrial de Madera

La figura 1.2 muestra el consumo de madera en Chile, durante el año 2017. Tal como se puede apreciar, la pulpa es una componente importante del mercado externo de la industria, ocupando el 37,7% del volumen de madera procesado por la industria chilena, que se traduce en un 47,5% del ingreso en exportaciones forestales totales (2,555\$US millones el año 2017) según CORMA [3]. Por este motivo se decide incorporar estocasticidad el modelo en precios de Pulpa.



Fuente: INFOR.

(1) Incluye trozas aserrables y pulpables.

(2) Incluye trozos para cajas y cajones, bins y madera hilada.

(3) Corresponden a lampazos y despuntes.

(4) El volumen de astillas destinado al mercado interno se distribuye en: 4.886.570 m³ se utilizan en la fabricación de pulpa; 765.575 m³ en fabricación de tableros; 714.917 m³ se destinan a combustible y 111.013 m³ a otros destinos.

Figura 1.2: Flujo de productos de madera, año 2017. Tomado de Anuario Forestal 2018, publicado por INFOR [4]

Cabe destacar que una tonelada de Pulpa requiere alrededor de 3 m³ de material pulpable¹ para su producción. Además de ser una componente con un mayor peso económico en la estimación de la utilidad de una estrategia de planificación, se decide incorporar incertidumbre sólo en la pulpa, debido a que esto permite explorar qué sucede en la planificación cuando sólo una componente varía.

1.3. Objetivos de Investigación

El objetivo principal de este trabajo es poner a prueba el modelo de simulación de precios de Pulpa basado en una *simulación de movimiento browniano*, marco con el cual es posible

¹Volumen de madera destinado a la producción de celulosa. En forma de trozos o astillas y aserrín.

generar escenarios de evolución para los precios futuros de Pulpa, mediante la simulación de volatilidades implícitas para los retornos de Pulpa en el mercado global.

Como objeto de estudio se utiliza el modelo de planificación integrada propuesto por Troncoso, D'Amours, Flisberg, Rönnqvist, y Weintraub en 2015 [10], el cual es modificado en un problema de programación estocástica entera mixto.

Específicamente, este trabajo estudia el problema de planificación integrado original, para formular una versión modificada que permita incorporar estocasticidad en precios de Pulpa. Con la versión modificada del problema, se estudia el comportamiento de las decisiones a tomar bajo distintos escenarios, construyendo instancias con distintas estructuras de incertidumbre, dónde se compara el resultado de éstas con el fin de determinar las estrategias que incrementan la utilidad esperada, según la capacidad del tomador de decisión para predecir la volatilidad futura en precios.

Además, se estudia la mejor estrategia para resolver el problema estocástico, considerando un enfoque práctico, con recursos computacionales limitados. Para esto se experimenta con la heurística Progressive Hedging y con una relajación lineal del problema estocástico, obteniendo resultados suficientemente satisfactorios, dada la imposibilidad técnica para resolver problemas enteros mixtos de la magnitud propuesta en este trabajo.

De esta forma, se espera mostrar los beneficios al predecir los precios del producto de mayor peso en la industria forestal en la toma de decisiones estratégicas para empresas integradas verticalmente. Comparando con los resultados obtenidos al resolver el problema original sometido a un escenario promedio, el cual es obtenido con el valor esperado de precios simulados para la instancia estocástica.

En los capítulos posteriores se profundiza el modelo de planificación integrada, como se abarca este problema estocástico, el uso de heurísticas para resolver el problema, y finalmente se presenta los resultados.

Capítulo 2

Marco Teórico

Este capítulo introduce conceptos y definiciones a utilizar en esta memoria, necesarios para introducir la programación estocástica y el algoritmo Progressive Hedging, utilizado para el desarrollo del trabajo realizado. El problema abarca decisiones bajo incertidumbre en múltiples etapas, que dificulta la resolución de este en tiempos razonables. Se busca obtener una estrategia para resolver el problema en forma óptima, o encontrar una heurística que genere un resultado cercano al óptimo, bajo la incertidumbre representada por cada escenario.

Se aborda el problema de una empresa forestal completamente integrada en forma vertical, es decir, la firma controla cada una de las partes de la cadena de producción descrita en la sección (1.2). Para incorporar estocasticidad al problema, se escoge simplificar la incertidumbre simulando precios aleatorios de Pulpa. Esta decisión tiene sentido bajo los siguiente supuestos:

En primer lugar, se reconoce que la celulosa es el producto que tiene mayor demanda a nivel global, siendo considerado un commodity. Lo que permite estudiar el comportamiento de su precio en el mercado con técnicas estudiadas y validadas en el ámbito de las finanzas.

Sumado a la conveniencia mencionada en el punto anterior, en Chile la mayor parte de la utilidad es generada mediante la venta de productos pulpables (trozos, celulosa, o sus derivados), tal como se muestra en la sección 1.2.1. Sin embargo, al ser el producto más demandado, es fácil ver que su precio es un factor en los precios de otros productos, por lo tanto, la mayor preocupación al proponer incorporar incertidumbre a los precios de Pulpa, es que pueda ser una simplificación extrema de la realidad.

Por otro lado, la compañía-tipo objeto de estudio tiene un alto nivel de integración vertical. Entonces, es plausible que desee optimizar la venta de productos finales en la cadena de producción, es decir, se asume que la empresa va a priorizar posicionamiento como líder en los mercados de cada uno de los productos finales, en vez de incurrir en esfuerzos para la venta de materia prima (venta de trozos o celulosa a otras compañías en la industria).

Como nota al margen, se espera que este trabajo sirva como escalón en el estudio de instancias estocásticas más complejas, que incorporen interacción de factores económicos en precios

de distintos productos, estocasticidad en costes, análisis de inversión bajo incertidumbre, y otros aspectos interesantes de la planificación forestal.

Este capítulo se organiza de la siguiente manera:

En la sección 2.1 se estudia las componentes necesarias para formular un problema de optimización estocástica mixto.

En la sección 2.2 se presenta el algoritmo Progressive Hedging utilizado en este trabajo.

En la sección 2.3 se muestra la técnica utilizada para simular los escenarios de precios para crear cada instancia en este trabajo.

Finalmente, en la sección 2.6 se explica en forma conceptual el problema descrito en Troncoso et al. [10], para mostrar en la sección 3 el modelo matemático del programa estocástico entero mixto.

2.1. Problema de Planificación Estocástico Entero Mixto

En el ámbito de Investigación de operaciones se trabaja con modelos y programas de optimización, los cuales están diseñados para tomar decisiones que minimizan o maximizan un modelo matemático dado. En la práctica, los problemas que pueden ser abarcados optimizando decisiones tienen todo tipo de naturalezas y peculiaridades, en especial, en la industria forestal, los problemas que son abordados mediante técnicas de optimización son problemas de asignación de recursos para la producción, este tipo de problema suele combinar decisiones modeladas como variables continuas (por ejemplo, cuánto volumen de madera cosechar o cuánto volumen transportar de una zona de cosecha a un aserradero determinado) con decisiones modeladas como variables enteras, en particular variables binarias (por ejemplo, si un área del bosque es cosechada o no y si un camino es construido o no). En este trabajo de incorpora, además, decisiones bajo incertidumbre (cuánta pulpa producir para un precio indeterminado al momento de tomar la decisión).

“Algunas decisiones deben tomarse hoy, pero la información importante no estará disponible hasta después que la decisión haya sido tomada” [6, p 2]

El problema original en el cual se basa este trabajo tiene la siguiente forma general, denominada **Problema Determinista (PD)**:

$$\begin{aligned} \max \quad & ax + cy \\ \text{s.a.} \quad & Ax + Cy \geq b, \\ & x \in \{0, 1\}, \\ & y \geq 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Dónde x e y representan los vectores de decisiones discretas y continuas, respectivamente. A , a , C y c corresponden a parámetros del problema, en mayúscula las matrices de restricciones y en minúscula costes e ingresos asociados a las decisiones a tomar, mientras b representa

el nivel mínimo de una restricción. En particular, el problema a abordar en este trabajo incorpora sólo variables continuas, no-negativas y variables binarias.

A este problema tipo se incorpora incertidumbre mediante la simulación de una cantidad finita de escenarios Ω . La incertidumbre debe cumplir con una cantidad finita de escenarios, debido a que las herramientas computacionales y matemáticas disponibles sólo pueden procesar una porción de la realidad a la vez, en una situación ideal, un problema de predicción toma en cuenta una cantidad infinita de escenarios posibles, entregando una estrategia completa para cada situación posible. En cambio, se utiliza una distribución de probabilidad para los escenarios plausibles valiosos para el análisis estocástico. Matemáticamente:

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{\omega \in \Omega} p_{\omega} (a_{\omega} \cdot x_{\omega} + c_{\omega} \cdot y_{\omega}) \\
 \text{st.} \quad & (x_{\omega}, y_{\omega}) \in Q_{\omega}, \quad \forall \omega \in \Omega \\
 & (x_{\omega,t}, y_{\omega,t}) = (x_{\omega',t}, y_{\omega',t}), \quad \forall \omega, \omega' \in N_t, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Donde existe una serie de variables (x, y) para cada escenario $\omega \in \Omega$, que cumplen las restricciones del PD. Además, estas variables deben respetar el principio de no-anticipatividad, el cual es explicado en la sección 2.1.1, entregando un ejemplo en la sección 2.1.2. Esta formulación es conocida como la **Forma Extendida (FE)**, para una cantidad pequeña de escenarios es fácil resolver la forma extendida como un problema entero mixto de gran tamaño. Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de nodos en el árbol de escenarios, la cantidad de memoria y CPU requeridos aumenta exponencialmente.

2.1.1. Principio de No-Anticipatividad

El principio de no-anticipatividad asegura que las decisiones tomadas en un problema de planificación estocástico sean consecuentes con la realidad. Según Rockafellar & Wets, 1976 [8] el principio de no-anticipatividad asegura que si dos escenarios son indistinguibles hasta cierta etapa, entonces las decisiones en esos escenarios, hasta esa etapa, sean las mismas. En términos prácticos, cada decisión que se tome para un escenario no anticipe las diferencias que éste tiene respecto a los otros escenarios que comparten la misma información hasta el periodo que dicha decisión debe ser ejecutada, como en la vida real, un tomador de decisiones actúa sólo en base a información pasada y a estimación de incertidumbre sobre el futuro.

2.1.2. Árboles de Escenarios

La optimización estocástica estudia la incorporación de aleatoriedad a los problemas mediante una discretización de todos los posibles estados de las incertidumbres mediante un número finito (por lo tanto, manejable) de casos posibles. En este trabajo se estudia escenarios de movimientos en el precio de la pulpa, es decir, cada escenario es un estado del mercado, en el cual se predice, con una cierta probabilidad los precios futuros de pulpa en una cantidad determinada de años. En estricto rigor, un escenario corresponde a un estado posible a experimentar por el sistema (precios, volumen de bosque, caminos, costes, etc.),

junto a la probabilidad de alcanzar ese estado en cada uno de los periodos del horizonte a estudiar.

Como la generación de escenarios es una aproximación discreta de la realidad, se toma una cantidad finita de escenarios bajo una distribución de probabilidad discreta, esto es, cada escenario está asociado a una probabilidad de que el sistema se encuentre en ese estado para el horizonte a analizar. La suma de la probabilidad de todos los escenarios debe ser igual a 1, representando cada caso posible. En el mundo real, sin embargo, la cantidad de estados del sistema son infinitos, por lo tanto, cada escenario debe ser generado como un set de valores representativo de un espacio de estados.

Ejemplo 2.1a

Sea un problema con horizonte temporal de 3 etapas ($t \in \{1, 2, 3\}$) que cuenta con 2 parámetros aleatorios A_1 y A_2 , los cuales pueden tomar alguno de 3 valores A_i^u , A_i^m o A_i^d . Un escenario queda definido por el vector numérico que contiene la información de los valores que toman los parámetros para cada etapa:

$$\omega_i = \{(A_1, A_2)_{t=1}, (A_1, A_2)_{t=2}, (A_1, A_2)_{t=3}\}, \quad \forall \omega_i \in \Omega$$

La suma de la probabilidad de todos los escenarios debe ser igual a 1, representando cada caso posible. Al momento de generar escenarios se toma en cuenta el presente como un periodo inicial conocido, agregando a las etapas el periodo 0 (hoy). Con lo que es posible generar un árbol de trayectorias para los estados del sistema, en el cual consiste en una representación simple del conjunto de escenarios Ω , partiendo del nodo raíz (etapa 0), tras el cual, el sistema puede evolucionar a cada uno de los estados posibles en la etapa siguiente. Cada nodo en las etapas 1 hasta el último periodo en el análisis puede evolucionar a cada uno de los estados posibles en la etapa siguiente, hasta llegar a la etapa final (etapa 3 en el ejemplo), el último nodo en cada escenario se llama **nodo hoja** o **nodo terminal**.

Ejemplo 2.1b

Continuando con el ejemplo 2.1a, se puede generar cinco escenarios:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \{(A_1^0, A_2^0), (A_1^u, A_2^u), (A_1^u, A_2^u), (A_1^u, A_2^u)\} \\ \omega_2 &= \{(A_1^0, A_2^0), (A_1^u, A_2^u), (A_1^m, A_2^m), (A_1^d, A_2^d)\} \\ \omega_3 &= \{(A_1^0, A_2^0), (A_1^m, A_2^m), (A_1^m, A_2^u), (A_1^m, A_2^m)\} \\ \omega_4 &= \{(A_1^0, A_2^0), (A_1^m, A_2^m), (A_1^m, A_2^u), (A_1^d, A_2^u)\} \\ \omega_5 &= \{(A_1^0, A_2^0), (A_1^m, A_2^m), (A_1^d, A_2^d), (A_1^d, A_2^u)\} \end{aligned}$$

Esta formulación puede ser expresada en forma de árbol, tal como muestra la figura 2.1, la forma extendida permite observar el principio de no-anticipatividad en forma gráfica.

La figura 2.1 muestra, encerrado en líneas punteadas, los escenarios que comparten la misma información, representando no-anticipatividad. En la forma de árbol, cada escenario que comparte no-anticipatividad en un periodo t comparte un nodo, y el camino correspondiente desde el nodo raíz hasta dicho nodo. Este principio asegura que las decisiones tomadas en cada periodo sigan una estrategia consistente con la información; en un caso real, el toma-

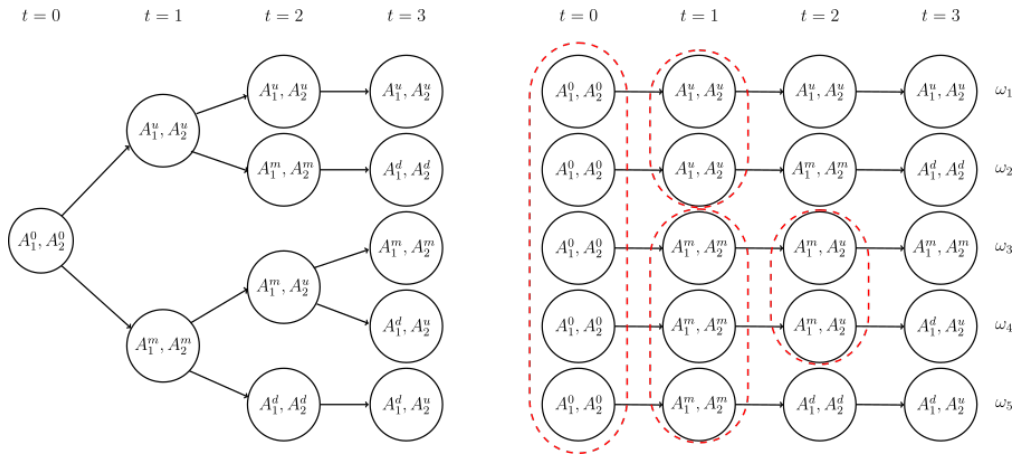


Figura 2.1: Árbol de escenarios junto a su representación como forma extendida.

dor de decisión sabe en qué nodo está y cómo llegó ahí, pero no sabe en qué situación se encontrará en el periodo siguiente. Si se toma en cuenta esto, en el periodo 2 hay sólo dos escenarios, en el periodo 3, sin embargo, hay cuatro estados posibles, pues ω_3 y ω_4 comparten no-anticipatividad hasta el periodo 4.

Por convención, se denota el super-conjunto de todos los nodos en el árbol de escenarios como N . El cual contiene a cada subconjunto de nodos $N_t \in N$ pertenecientes a la etapa $t \in T$. Con esto, un árbol de escenarios definido correctamente cumple con las siguientes propiedades:

1. Cada nodo $\nu \in N_t$ contiene al menos un escenario:

$$\forall \nu \in N_t, \forall t \in T, \exists \omega_i \in \Omega : \omega_i \in \nu$$

2. La cantidad de nodos aumenta en cada etapa:

$$|N_t| \leq |N_{t+1}|$$

3. En la primera etapa hay sólo un nodo, el cual contiene a todos los escenarios:

$$\nu_0 = \Omega, \nu_0 \in N_0$$

4. En la última etapa t^* cada nodo contiene sólo un escenario:

$$|N_{t^*}| = |\Omega|$$

2.2. Generación de Escenarios de Precios de Pulpa

Para simular los precios de pulpa se estudia los precios mensuales de pulpa tomados del banco mundial entre los años 2000 y 2014. Se usa un modelo GARCH (en inglés "Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity"), el cual es una forma generalizada de un modelo de movimiento browniano, utilizado para simular la volatilidad implícita de los retornos de pulpa en el mercado. Una vez que se tiene una volatilidad implícita para cada periodo,

se simula trayectorias de precio que parten del precio observado a fines del año 2014. Cada escenario corresponde a una clase representativa de una porción de las trayectorias simuladas, en esta sección se explica en términos generales la metodología y en la siguiente se explica las distintas estrategias usadas para escoger las clases representativas y generar distintos tipos de instancia.

2.2.1. Modelo Browniano Generalizado

Este modelo nace de la observación de movimiento de partículas en un fluido, en el cual, debido a colisiones aleatorias con las moléculas del fluido, es imposible predecir el movimiento de las partículas con una ecuación de movimiento basado en física clásica. Sin embargo, es posible describir la probabilidad de que una partícula se mueva en una dirección u otra. Este principio es usado ampliamente en finanzas para modelar un comportamiento aleatorio continuo que evoluciona a medida que pasa el tiempo.

En su forma más simple, se puede usar un modelo de movimiento browniano para describir los retornos de un activo con precio continuo en el mercado bursátil. Sea r una variable aleatoria que representa el retorno de dicho activo, esta variable puede ser modelada como un movimiento browniano dónde una variación Δr en un periodo de tiempo Δt queda definida por $\Delta r = \varepsilon \cdot \sqrt{\Delta t}$ con $\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma)$, donde σ representa la volatilidad del activo. Asumiendo una media μ constante para los retornos, se obtiene:

$$\begin{aligned} r_t &= \mu + \sigma \cdot \varepsilon \\ \varepsilon &\sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \end{aligned} \tag{2.3}$$

Iterando sobre simulaciones aleatorias del parámetro ε usando un generador de valores para la variable aleatoria normal se obtiene un conjunto de retornos para cada periodo. Como el retorno representa el cambio logarítmico del precio en cada periodo, partiendo de un precio base, se obtienen las trayectorias de precio:

$$P_t = P_{t-1} \cdot e^{r_t \cdot \Delta t} \tag{2.4}$$

2.2.2. Modelo EGARCH

El modelo EGARCH, utilizado en este trabajo expande el movimiento browniano generalizado, usando heterocedasticidad para simular las volatilidades implícitas de los retornos del precio del activo.

$$\begin{aligned} r_t &= \mu + \sigma \cdot \varepsilon \\ \sigma_t^2 &= \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i \sigma_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j \varepsilon_{t-j}^2 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Los parámetros α_0 , α_i y β_j son obtenidos utilizando el método de máxima verosimilitud sobre una serie de retornos, obtenidos mediante datos históricos de precio de Pulpa observados,

como en Danielsson (1994) [2]. Este métodos permite realizar una simulación de Montecarlo para retornos futuros, los cuales pueden ser traducidos a trayectorias de cambio de precio, a partir de un precio base (año 1 en el modelo de programación estocástica). Tomando el precio base, se obtiene precios representativos para cada periodo de negocio. El autor recomienda usar al menos 10.000 trayectorias para simular escenarios, tomando para cada año clases representativas de la cantidad de casos deseados, de manera tal que cada nodo en el árbol de escenarios refleja un precio representativo, junto a la probabilidad condicional de la densidad de probabilidad estimada para los posibles precios en cada periodo.

2.3. Planificación Forestal Integrada

Cuando una empresa se encuentra en una situación de integración vertical completa, la controladora tiene la facilidad para coordinar cada una de las componentes de su cadena de producción, delegando las decisiones estratégicas a la matriz. En Chile, las dos empresas con mayor participación en el mercado forestal (Arauco y CMPC) se encuentran integradas verticalmente, sin embargo, históricamente la planificación ha seguido una estrategia basada en la disponibilidad de insumos, en la cual, la planificación de operaciones en el bosque es el motor de la planificación industrial, y por lo tanto, lo que dicta las decisiones tácticas de toda la cadena [10].

Troncoso muestra que una estrategia que integra las decisiones del bosque y de la producción industrial en el mismo problema de optimización puede aumentar el valor presente neto de toda la cadena hasta en un 5

Este modelo, innova en que la cadena de producción y sus decisiones dependen directamente de la demanda, por lo tanto, las decisiones a nivel bosque, responden tanto al precio de los productos finales, como a la demanda por insumos que generan los clientes internos de la firma, la cual está basada en el nivel de producción mínimo y la demanda externa de cada producto final.

2.3.1. Cadena de Producción Forestal Integrada

El problema de planificación integrada toma en cuenta como componentes de la cadena de producción integrada verticalmente los siguientes elementos:

Operación en el bosque:

Vivero Forestal: Se encarga principalmente del proceso de multiplicación de las plantas, sus características manejo y atención depende del destino de las plantas. Su ubicación es cercana a las áreas a reforestar. En este trabajo se modela como parte del coste de cosecha, asumiendo que en el mismo periodo en que un rodal es cosechado se logra la re-forestación completa.

Rodales: El bosque se divide en zonas de cosecha, llamadas rodales (en inglés: Stands), cada zona contiene árboles de la misma especie. Cada rodal se mide según edad (medida en

años), área (medida en hectáreas) y densidad de madera [m^3/ha], por lo tanto, la unidad de producción del bosque es el volumen de madera por rodal.

Cosecha: Cada rodal tiene una edad mínima de cosecha (dado por la madurez de la especie plantada, según el volumen de madera que puede entregar por unidad de área), por ejemplo, la especie *pinus radiata* puede ser cosechada cuando el rodal cumple 20 años. Parte de las operaciones de cosecha incluye la poda de árboles talados (en inglés: Bucking), proceso que transforma cada árbol en distintos trozos, listos para ser procesados en aserraderos o plantas. Los trozos pueden ser vendidos directamente desde el bosque o enviados a aserraderos, plantas de celulosa, o plantas de energía.

Caminos: La construcción de caminos es parte importante de la planificación forestal, en D'Amours, Rönnqvist and Weintraub [1] se modela el problema de planificación con caminos existentes antes del horizonte y caminos potenciales a ser construidos como parte de las operaciones forestales.

Operación en plantas:

Aserraderos: cada aserradero tiene por objetivo reducir los troncos en productos aserrables (distintos tipos de tableros, chapas, postes y polines) listos para la venta al retail y co-productos, los cuales son enviados a otras plantas (por ejemplo, astillas destinadas a la producción de pulpa o como combustible en las plantas de electricidad).

Plantas de Celulosa: utilizan troncos y co-productos para extraer celulosa, la cual es utilizada en la industria del papel o es vendida por tonelada. La producción de celulosa es modelada mediante factores de conversión de volumen a toneladas de pulpa. .

Plantas eléctricas: una pequeña parte de la producción forestal es usado en generación de energía, principalmente en forma de biomasa, tal cual como opera a forestal Arauco con cinco plantas instaladas en Chile, según su reporte de sostenibilidad publicado el año 2017 [9]. La producción de electricidad es modelada usando unidades de MWh, el cual es estimado como un promedio generado a partir de $1m^3$ de materia prima.

Operaciones de distribución: Los distribuidores y retailers se encargan de la distribución, exportación y venta de productos finales tanto en el mercado nacional como internacional. La cual está incorporada en el modelo como parte del coste variable de producción, debido a que se asume empresas pertenecientes al controlador de la misma cadena forestal.

Junto a estos elementos, el programa toma en consideración los siguientes parámetros para definir la planificación forestal integrada:

Horizonte de planificación: El problema toma un horizonte de 25 años y lo divide en dos horizontes de planificación. El primero de estos es utilizado para planificación a corto-mediano plazo, resolviendo el detalle de las operaciones anuales del bosque, aserraderos y plantas; este denominado Horizonte de Planificación de Negocio (T_B), que abarca 5 periodos de 1 año cada uno. Mientras los 20 años restantes son considerados como periodos de planificación estimada, reduciendo las decisiones a operaciones en el bosque en plazos de 5 años por periodo, este horizonte es denominado de Anticipación (T_A).

Parámetros económicos: Durante el horizonte de negocio el modelo considera ingresos por venta de productos aserrables (en forma de tableros, llamados en el programa original: Long Board, Square Board, Lateral Board), Pulpa, Electricidad y venta de troncos directa desde el bosque a compañías externas. Además, el modelo toma en cuenta costes de cosecha, transporte y producción. Durante el horizonte de anticipación el modelo considera sólo venta de trozos desde el bosque, modificando el precio de cada trozo, según su valor esperado bajo un escenario promedio, anticipando la venta de productos para los periodos en los cuales la predicción de precios tiene una confianza baja.

Parámetros del bosque: El problema toma en cuenta un tipo de árbol (especie), los cuales son modelados según volumen anual por hectárea. De esta forma cada rodal queda definido por el volumen de madera esperado en cada periodo. Además, la cosecha es modelada según factores de conversión como un porcentaje en cada tipo de tronco (patrones de corte), la decisión de corte o podado (del inglés *Bucking*) resulta en un cierto volumen de cada tipo de trozo obtenido en el rodal (5 tipos de tronco aserrable, 1 tipo de tronco pulpable, 1 tipo de tronco destinado a electricidad)

Parámetros de transporte: El problema modela el transporte mediante restricciones de flujo entre cada rodal y aserraderos o plantas. Mientras el coste de transporte es calculado como un coste promedio unitario de transporte multiplicado la distancia y volumen transportado en cada periodo. De la misma forma, los el volumen de co-productos transportado entre aserraderos y plantas es multiplicado por el coste unitario de transportar $1m^3$ por kilómetro. Estos costes dependen del tipo de tronco o co-producto transportado.

Parámetros de producción: Cada aserradero y planta es modelado mediante patrones, de la misma forma que se calcula el volumen de cada tipo de trozo obtenido en rodales. En este caso, cada tipo de tronco o co-producto, en cada aserradero o planta posee un patrón que indica el volumen o masa de producto final obtenido por cada m^3 que ingresa. Manteniendo el balance de flujo. Los costes de producción son calculados como la ocupación multiplicada por el coste operacional promedio. Para que el coste sea una estimación consistente, cada aserradero y planta debe operar entre márgenes en los cuales el coste marginal abarca tanto costes fijos como variables, con tal propósito se incluye restricciones de producción mínima y máxima.

Ingresos: La venta de productos es calculada mediante el volumen total obtenido multipli-

cado por el precio en cada periodo. Además, es considerado como ingreso el valor potencial final del bosque, asignando un valor a cada m^3 de bosque en el final del horizonte. Estos valores son modelados como parte de la función objetivo, junto a los costes antes mencionados.

Capítulo 3

Formulación Matemática del Problema de Optimización Estocástico Mixto

Se toma el modelo de programación entera mixta presentado por Troncoso et al. [10], el cual es modificado según se describe en la sección 2. En esta sección se presenta las componentes del problema matemático modificado.

3.1. Sets de Indices

- T_B : Periodos en el horizonte de planificación de negocios, $T_B = \{1, 2, 3, 4, 5\}$.
- T_A : Periodos en el horizonte de planificación de anticipación, $T_A = \{6, 7, 8, 9\}$.
- T : Todos los periodos incluidos en el horizonte de planificación ($T_B \cup T_A$).
- \mathcal{T} : Etapas en el árbol de escenarios $\mathcal{T} = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5\}$.
- T_τ : Periodos que abarca la etapa τ . Las etapas τ_1 a la τ_4 abarcan un periodo cada una (en las cuales se se incorpora estocasticidad), la etapa final abarca los periodos terminales, $T_{\tau_5} = \{5, 6, 7, 8, 9\}$.
- Ω : Todos los escenarios incluidos en la instancia.
- \mathcal{N} : Todos los nodos del árbol de escenarios.
- \mathcal{N}_ω : Conjunto de nodos que definen el escenario ω .
- \mathcal{N}_τ : Todos los nodos de la etapa τ .
- I : Todos los rodales que definen el bosque.
- I_t^0 : Rodales que no deben ser talados en el periodo $t \in T$, debido a que su edad es inferior a la edad de madurez durante periodo.
- J : Aserraderos junto a todas las plantas de pulpa y energía.
- K : Especies de árboles.
- L : Tipos de tronco.

- D^c : Coproductos, los cuales pueden ser usados como materia prima en plantas de pulpa y energía.
- D^f : Productos finales.
- R : Materias primas en aserraderos y plantas ($R = L \cup D^f$).
- D : Todos los tipos de producto ($D = D^c \cup D^f$).
- P^B : Patrones de podado a usar en los rodales (Bucking Patterns).
- P_j^J : Todos los procesos y patrones disponibles en aserraderos y plantas j .
- N : Niveles de precio.

3.2. Parámetros

- S_{ikt} : Volumen de árboles tipo k en el rodal i , durante el periodo t .
- S_{it} : Volumen total de bosque en el rodal i , durante el periodo t .
- h_{it} : Capacidad requerida para cosechar el rodal i , durante el periodo t . Por ejemplo: una unidad de capacidad de cosecha corresponde a la maquinaria y mano de obra requerida en la cosecha de $100m^3$ de madera. Si un rodal i , durante el periodo t , tiene $9890m^3$ de madera, requiere 99 unidades de capacidad de cosecha.
- H_t : Capacidad de cosecha total disponible durante el periodo t .
- α_{ikplt}^1 : Factor de conversión del patrón de podado p en el rodal i , para obtener troncos tipo l a partir de árboles tipo k . Durante el periodo t .
- a_t^- : Decrecimiento máximo permitido en el volumen cosechado, como porcentaje cosechado en el periodo t , para el periodo $t + 1$.
- a_t^+ : Incremento máximo permitido en el volumen cosechado, como porcentaje cosechado en el periodo t , para el periodo $t + 1$.
- a^{a-} : Volumen mínimo permitido de cosecha durante todos los periodos incluidos en el horizonte de planificación de negocio (T_B), como un porcentaje de la cosecha promedio en periodos de 5 años para todo el horizonte de planificación (T).
- a^{a+} : Volumen máximo permitido de cosecha durante todos los periodos incluidos en el horizonte de planificación de negocio (T_B), como un porcentaje de la cosecha promedio en periodos de 5 años para todo el horizonte de planificación (T).
- V_t^0 : Volumen inicial de bosque perteneciente a la clase t . Para cada $t \in T_A$ se define una clase de edad como: árboles de edad superior a los años contenidos en $[t + 1, t_{n_A}^A]$ e inferior a la cantidad de años incluidos en $[t, t_{n_A}^A]$. Por ejemplo, para $t = 6$, la clase de edad contiene todos los rodales de edades entre 15 y 20 años, asumiendo el caso en que $t_{n_A} = 20$. Este valor representa el volumen de bosque que debe crecer en los rodales talados durante el periodo t para que al final del horizonte el bosque recupere su estructura original.

- V_i^1 : Volumen que tendrá el rodal i al final del horizonte de planificación si no es cosechado.
 V_{it}^2 : Volumen final de bosque que crecerá en el rodal i , tras al ser cosechado durante el periodo t .
 V^3 : Volumen inicial de bosque de edad superior a la cantidad de años incluidos en el periodo de anticipación. Este valor representa el volumen de bosque que debe ser recuperado al cosechar durante el periodo de negocio.
 α_{jprd}^2 : Factor de conversión por unidad de materia prima (troncos o coproductos) tipo r a ser transformada en productos o coproductos d bajo el patrón o proceso p , durante el periodo t . Medido en porcentaje de 1 unidad de producto o coproducto resultante de procesar 1 unidad de materia prima.
 \bar{e}_{jt} : Cota superior para la producción en el aserradero o planta j .
 \underline{e}_{jt} : Cota inferior para la producción en el aserradero o planta j .
 b_{dnt} : Demanda del producto final d , bajo el nivel de precio n , durante el periodo t .

Todos los costes y precios utilizados tienen la unidad US\$. Calculados como un estimado, incorporando el factor de descuento como ponderador en la función objetivo.

- v_i^0 : Valor esperado del rodal i al final de horizonte de planificación si no es cosechado.
 v_{lt}^2 : Valor esperado de una unidad de troncos tipo l en el periodo t .
 v_{it}^3 : Valor esperado del stand i al final del horizonte de planificación, si es cosechado en el periodo t .
 c_{it}^0 : Coste unitario estimado de cosecha del rodal i durante el periodo t .
 c_{ijt}^1 : Coste unitario estimado de transportar madera desde el rodal i al aserradero o planta j , durante el periodo t .
 $c_{j_1j_2ct}^2$: Coste unitario estimado de transportar co-productos tipo c desde el aserradero o planta j_1 al aserradero o planta j_2 , durante el periodo t .
 c_{jpt}^3 : Coste unitario estimado para el patrón o proceso p , en el aserradero o planta j , durante el periodo t .
 Δ_t : Factor de descuento para usar en la función objetivo en los términos indexados en el periodo t . Tomando \bar{t} como el punto medio del periodo t , se tiene: $\Delta_t = 1/(1+\alpha)^{\bar{t}}$.
 $P_{\omega dnt}^1$: Precio estimado de mercado del producto final d y nivel de precio n , durante el periodo t , bajo el escenario ω .
 ν_τ^- : Padre del nodo ν . Con $\nu \neq \nu_0$ (nodo raíz).
 p_ν : Probabilidad condicional de llegar al nodo ν desde el nodo ν_τ^- .
 p_ω : Probabilidad del escenario ω , calculado como la multiplicación consecutiva de las probabilidades condicionales de los nodos que contienen al escenario ω

3.3. Variables de Decisión

Las variables descritas en esta sub sección corresponden a las decisiones a tomar en el modelo original para cada escenario ω , modificación necesaria para el programa estocástico:

$$Z_{\omega it} \begin{cases} 1 & \text{Si el rodal } i \text{ es cosechado en el periodo } t, \text{ bajo el escenario } \omega. \\ 0 & \text{Si no.} \end{cases}$$

$$Z_{\omega i}^0 \begin{cases} 1 & \text{Si el rodal } i \text{ no es cosechado bajo el escenario } \omega. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

$Y_{\omega ikpt}$: Volumen de árboles de especie k procesado en el rodal i bajo el patrón de podado p , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$Y_{\omega jpc}^1$: Volumen de materia prima c procesada en el aserradero o planta j , bajo el patrón o proceso p , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$X_{\omega l}^0$: Volumen de troncos tipo l no transportados desde el rodal i , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$X_{\omega ijlt}^1$: Volumen de troncos tipo l transportados desde el rodal i hacia el aserradero o planta j , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$X_{\omega j_1 j_2 ct}^2$: Volumen de co-productos tipo c transportados desde el aserradero o planta j_1 hacia la planta j_2 , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$W_{\omega jdt}$: Unidades de producto final d obtenidas del aserradero o planta j , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$U_{\omega dnt}^1$: Venta (en unidades) del producto d , bajo en nivel de precios n , durante el periodo t , bajo el escenario ω

$U_{\omega l}^2$: Venta de troncos tipo l , desde el rodal i , durante el periodo t , bajo el escenario ω

3.4. Función Objetivo

El programa optimiza la utilidad esperada de todos los escenarios, multiplicando el ponderador de probabilidad por la utilidad de cada escenario, la cual es dividida como función de las etapas pertenecientes al horizonte de planificación de negocio sumado a la utilidad terminal del horizonte de planificación anticipada. Además incorpora un factor de descuento α , el cual se utiliza para traer a valor presente los costes e ingresos del modelo. Cada sumatoria de la función es multiplicada por $1/(1 + \alpha)^{\hat{t}}$, donde \hat{t} corresponde al punto medio del periodo t en años, por ejemplo, para el periodo $t = 6$, se tiene $\hat{t} = 7,5$.

$$\max \sum_{t \in T} p_{\omega} \cdot \left(\sum_{t \in T_B} \Delta_t \cdot F_B^{\omega}(t) + F_A^{\omega} \right)$$

A continuación se explica en detalle cada componente de la función objetivo para el horizonte de planificación de negocio (T_B):

$$F_B^\omega(t) = \sum_{d \in D^f} \sum_{n \in N} P_{\omega dnt}^1 \cdot U_{\omega dnt}^1 + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} v_{lt}^2 \cdot U_{\omega lnt}^2 - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} c_{ijt}^1 \cdot X_{\omega ijlt}^1 \\ - \sum_{j_1 \in J} \sum_{j_2 \in J} \sum_{c \in D^c} c_{j_1 j_2 ct}^2 \cdot X_{\omega j_1 j_2 ct}^2 - \sum_{i \in I} c_{it}^0 \cdot Z_{\omega it} - \sum_{j \in J} \sum_{p \in P_j^J} \sum_{c \in C} c_{jpt}^3 \cdot Y_{\omega j p ct}^1$$

Donde:

(A) Ingreso por venta de productos finales para el periodo de negocio t , bajo el escenario ω :

$$\sum_{d \in D^f} \sum_{n \in N} P_{\omega dnt}^1 \cdot U_{\omega dnt}^1$$

(B) Ingreso por venta de troncos, durante el periodo de negocio t , bajo el escenario ω :

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} v_{lt}^2 \cdot U_{\omega lnt}^2$$

(C) Coste de transporte de troncos entre rodales y aserraderos o plantas, durante el periodo t , bajo el escenario ω :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} c_{ijt}^1 \cdot X_{\omega ijlt}^1$$

(D) Coste de transporte de coproductos hacia plantas de Pulpa o Electricidad, durante el periodo t , bajo el escenario ω :

$$\sum_{j_1 \in J} \sum_{j_2 \in J} \sum_{c \in D^c} c_{j_1 j_2 ct}^2 \cdot X_{\omega j_1 j_2 ct}^2$$

(E) Coste de cosecha en el periodo t , bajo el escenario ω :

$$\sum_{i \in I} c_{it}^0 \cdot Z_{\omega it}$$

(F) Coste de operación del aserraderos y plantas durante el periodo t , bajo el escenario ω :

$$\sum_{j \in J} \sum_{p \in P_j^J} \sum_{c \in C} c_{jpt}^3 \cdot Y_{\omega j p ct}^1$$

A continuación se explica en detalle cada componente de la función objetivo para el horizonte de planificación de anticipación (T_A):

$$F_A^\omega = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T_A} \Delta_t \cdot v_{lt}^2 \cdot U_{\omega lnt}^2 + \Delta_9 \cdot \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} v_{it}^3 \cdot Z_{\omega it} + \Delta_9 \cdot \sum_{i \in I} v_i^0 \cdot Z_{\omega i} - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_A} \Delta_t \cdot c_{it}^0 \cdot Z_{\omega it}$$

Donde:

- (G) Ingreso estimado de la venta futura de productos, expresado como venta de troncos desde rodales, tomando el valor promedio de la venta durante el periodo de negocios de un escenario promedio. Considerando las decisiones de cosecha del escenario ω :

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T_A} \Delta_t \cdot v_{lt}^2 \cdot U_{\omega l t}^2$$

- (H) Valor estimado del bosque recuperado tras reforestación según las decisiones de cosecha del escenario ω , en el último periodo del horizonte de planificación:

$$\Delta_9 \cdot \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} v_{it}^3 \cdot Z_{\omega i t}$$

- (I) Valor estimado del bosque de los rodales que no son cosechados bajo las decisiones de cosecha del escenario ω :

$$\Delta_9 \cdot \sum_{i \in I} v_i^0 \cdot Z_{\omega i}^0$$

- (J) Coste estimado de cosecha de las decisiones tomadas bajo el escenario ω , durante el horizonte de anticipación (T_A):

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_A} \Delta_t \cdot c_{it}^0 \cdot Z_{\omega i t}$$

3.5. Restricciones

El modelo usado en este trabajo se basa en el modelo de Troncoso (2014) con algunas modificaciones, en particular, la reformulación de las restricciones (5), (6), (7) y (8). Este cambio se debe a que en la formulación anterior los factores de conversión en las plantas de pulpa y electricidad no eran claros en la formulación matemática, en este trabajo son modelados siguiendo la descripción entregada. Además, se analiza las variables que deben cumplir el principio de no-anticipatividad y las variables derivadas de estas, las cuales, quedan definidas mediante restricciones de variables no-anticipativas.

- (1) Cada rodal puede ser cosechado a lo más una vez, o no es cosechado:

$$\sum_{t \in T} Z_{\omega i t} + Z_{\omega i}^0 = 1, \quad i \in I, \omega \in \Omega$$

- (2) Todo el volumen cosechado debe ser transformado en troncos, mediante algún patrón de podado (Bucking Pattern):

$$\sum_{p \in P^B} Y_{\omega i k p t}^0 = S_{i k t} \cdot Z_{\omega i t}, \quad i \in I, k \in K, t \in T, \omega \in \Omega$$

- (3) Balance de transporte desde rodales para cada periodo t . Todo el volumen no transportado debe ser destinado a venta directa desde el rodal i :

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^B} \alpha_{ikplt}^1 \cdot Y_{\omega ikpt}^0 = \sum_{j \in J} X_{\omega ijlt}^1 + X_{\omega ilt}^0, \quad i \in I, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega$$

- (4) La venta directa desde el rodal i debe ser, a lo más, el volumen no transportado a aserraderos o plantas:

$$U_{\omega ilt}^2 \leq X_{\omega ilt}^0, \quad i \in I, l \in L, t \in T, \omega \in \Omega$$

- (5) Balance en transporte entrante a aserraderos y plantas. El volumen total de troncos procesado en el aserradero o planta j debe ser igual al total transportado desde todos los rodales, durante el periodo t :

$$\sum_{p \in P_j^J} Y_{\omega jplt}^1 = \sum_{i \in I} X_{\omega ijlt}^1, \quad j \in J, l \in L, t \in T_B, \omega \in \Omega$$

- (6) Balance en transporte entrante a plantas, desde aserraderos y plantas. Todo el volumen de co-productos proveniente desde aserraderos y plantas j_1 debe ser procesado bajo el proceso p de la planta j_2 (los aserraderos sólo procesan troncos provenientes de rodales):

$$\sum_{p \in P_{j_2}^J} Y_{\omega j_2pct}^1 = \sum_{j_1 \neq j_2 \in J} X_{\omega j_1j_2ct}^2, \quad j_2 \in J, c \in D^c, t \in T_B, \omega \in \Omega$$

- (7) El total de producto final d producido en el aserradero o planta j debe corresponder al porcentaje entregado por patrón o proceso utilizado:

$$\sum_{p \in P_j^J} \sum_{c \in C} \alpha_{jpc}^2 \cdot Y_{\omega jpc}^1 = W_{\omega jdt}, \quad j \in J, d \in D^f, t \in T_B, \omega \in \Omega$$

- (8) El total de cada co-producto entregado por el proceso p en el aserradero o planta j_1 debe ser transportado a alguna otra planta j_2 . Los co-productos son utilizados en la elaboración de Pulpa y Electricidad, generando desechos en vez de otro co-producto reutilizable:

$$\sum_{p \in P_{j_1}^J} \sum_{c \in C} \alpha_{j_1pc}^2 \cdot Y_{\omega j_1pc}^1 \geq \sum_{j_2 \neq j_1 \in J} X_{\omega j_1j_2dt}^2, \quad j_1 \in J, d \in D^c, t \in T_B, \omega \in \Omega$$

- (9) La producción está acotada por la demanda:

$$\sum_{n \in N} U_{\omega dnt}^1 = \sum_{j \in J} W_{\omega jdt}, \quad d \in D^f, t \in T_B, \omega \in \Omega$$

- (10) Sólo se cosecha un rodal cuando hay capacidad de cosecha disponible:

$$\sum_{i \in I} h_{it} \cdot Z_{\omega it} \leq H_t, \quad t \in T, \omega \in \Omega$$

(11) Capacidad máxima de volumen procesado en aserraderos y plantas:

$$\sum_{d \in D} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_j^d} \alpha_{j1pct}^2 \cdot Y_{\omega j p c t}^1 \leq \bar{e}_{jt}, \quad j \in J, t \in T, \omega \in \Omega$$

(12) Capacidad mínima de operación para aserraderos y plantas:

$$\sum_{d \in D} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P_j^d} \alpha_{j1pct}^2 \cdot Y_{\omega j p c t}^1 \geq \underline{e}_{jt}, \quad j \in J, t \in T, \omega \in \Omega$$

(13) La producción no puede superar la demanda total del producto final d:

$$U_{\omega d n t}^1 \leq b_{d n t}, \quad d \in D^f, n \in N, t \in T, \omega \in \Omega$$

(14a) Límite para la reducción del volumen cosechado entre periodos, excepto entre horizontes de planificación:

$$\sum_{i \in I} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \geq a_t^- \cdot \sum_{i \in I} S_{i,t+1} \cdot Z_{\omega,i,t+1}, \quad \omega \in \Omega, t \in T : t \neq 5, t \neq 9$$

(14b) Límite para incrementar el volumen cosechado entre periodos, excepto entre horizontes de planificación:

$$\sum_{i \in I} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \leq a_t^+ \cdot \sum_{i \in I} S_{i,t+1} \cdot Z_{\omega,i,t+1}, \quad \omega \in \Omega, t \in T : t \neq 5, t \neq 9$$

(15a) Límite para la reducción del volumen cosechado en el primer periodo del horizonte de anticipación, respecto al total cosechado durante el horizonte de negocio:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_B} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \geq a_5^- \cdot \sum_{i \in I} S_{i,6} \cdot Z_{\omega,i,6}, \quad \omega \in \Omega$$

(15b) Límite para incrementar el volumen cosechado en el primer periodo del horizonte de anticipación, respecto al total cosechado durante el horizonte de negocio:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_B} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \geq a_5^+ \cdot \sum_{i \in I} S_{i,6} \cdot Z_{\omega,i,6}, \quad \omega \in \Omega$$

(16a) Límite superior para la cosecha en los periodos de anticipación, basado en el promedio:

$$\sum_{i \in I} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \geq a^{a-} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{\bar{t} \in T} \frac{S_{i\bar{t}} \cdot Z_{\omega i \bar{t}}}{|T_A|+1}, \quad t \in T_A, \omega \in \Omega$$

(16b) Límite inferior para la cosecha en los periodos de anticipación, basado en el promedio:

$$\sum_{i \in I} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \leq a^{a+} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{\bar{t} \in T} \frac{S_{i\bar{t}} \cdot Z_{\omega i\bar{t}}}{|T_A|+1}, \quad t \in T_A, \omega \in \Omega$$

(17a) Límite inferior para la cosecha total del horizonte de negocios, basado en el promedio:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_B} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \geq a^{a-} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{\bar{t} \in T} \frac{S_{i\bar{t}} \cdot Z_{\omega i\bar{t}}}{|T_A|+1}, \quad \omega \in \Omega$$

(17b) Límite superior para la cosecha total del horizonte de negocios, basado en el promedio:

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_B} S_{it} \cdot Z_{\omega it} \leq a^{a+} \cdot \sum_{i \in I} \sum_{\bar{t} \in T} \frac{S_{i\bar{t}} \cdot Z_{\omega i\bar{t}}}{|T_A|+1}, \quad \omega \in \Omega$$

(18) Sólo se puede cosechar un rodal rodal si es mayor a una cierta edad:

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I_t^0} Z_{\omega it} = 0, \quad \omega \in \Omega$$

(19) El volumen de bosque que es recuperado al cosechar en cada periodo de anticipación debe ser al menos el volumen original de la case de edad correspondiente:

$$\sum_{i \in I} V_{it}^2 \cdot Z_{\omega it} \geq V_t^0, \quad t \in T_A, \omega \in \Omega$$

(20) Se debe recuperar el volumen de bosque de edad mayor a la cantidad de años incluidos en el horizonte de anticipación, al final del horizonte de planificación:

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{t \in T_B} V_{it}^2 \cdot Z_{\omega it} + V_i^1 \cdot Z_{\omega i}^0 \right) \geq V^3, \quad \omega \in \Omega$$

(21) Restricción de variables binarias:

$$Z_{\omega it}, Z_{\omega i}^0 \in \{1, 0\}, i \in I, t \in T, \omega \in \Omega$$

(22) Restricción de no-negatividad:

$$\text{Todas las Variables} \geq 0$$

(23a) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de cosecha:

$$Z_{\omega it_\nu} = Z_{\omega \bar{i} t_\nu}, \quad i \in I, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

(23b) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de podado:

$$Y_{\omega i k p t_\nu}^0 = Y_{\omega \bar{i} k p t_\nu}^0, \quad i \in I, k \in K, p \in P^B, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

(23c) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de transporte desde rodales:

$$X_{\omega ijlt\nu}^1 = X_{\bar{\omega} ijlt\nu}^1, \quad i \in I, j \in J, l \in L, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

(23d) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de producción:

$$Y_{\omega jpc\nu}^1 = Y_{\bar{\omega} jpc\nu}^1, \quad j \in J, p \in P_j^J, c \in C, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

(23e) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de transporte entre aserraderos o plantas y plantas:

$$X_{\omega j_1 j_2 c \nu}^2 = X_{\bar{\omega} j_1 j_2 c \nu}^1, \quad j_1 \in J, j_2 \in J : j_1 \neq j_2, c \in D^c, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

(23f) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de venta de productos:

$$U_{\omega dnt\nu}^1 = U_{\bar{\omega} dnt\nu}^1, \quad d \in D^f, n \in N, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

(23g) Restricciones de no-anticipatividad para las variables de venta de troncos:

$$U_{\omega ilt\nu}^2 = U_{\bar{\omega} ilt\nu}^1, \quad i \in I, l \in L, \nu \in \mathcal{N} : \omega \neq \bar{\omega} \in \Omega_\nu$$

Capítulo 4

Resolución del Problema Estocástico

En este capítulo se explica las herramientas usadas para implementar el problema estocástico y su resolución. En primer lugar, se describe las herramientas de programación computacional, para luego mostrar la elaboración de instancias de escenarios de precios de Pulpa, junto a comparar una heurística de descomposición para resolver el problema, Progressive Hedging (PH), utilizando la estrategia propuesta por Watson y Woodruff en [12], para discutir las ventajas de utilizar una relajación lineal y bajo que supuestos se presentan los resultados obtenidos en este trabajo.

4.1. Python Optimization Modeling Objects (PYOMO)

Pyomo es un lenguaje algebraico de alto nivel, basado en el lenguaje de programación python, que permite especificar un modelado matemático del problema en forma intuitiva y compleja a la vez, su flexibilidad y calidad de *software open source* proporcionan amplias posibilidades para el desarrollo de un programa computacional específico para las necesidades de cada problema. Una guía completa sobre las facultades y extensiones del programa se encuentran en el libro **Pyomo-optimization modeling in python** [5].

La principal ventaja de PYOMO es que el paquete de libre acceso incorpora el uso de *plug-ins*, los cuales pueden ser modificados por el usuario, además la posibilidad de incorporar nuevos *plug-ins* para adaptar el programa a las necesidades específicas del problema a resolver. El paquete se compone de los siguientes módulos: Pyomo, que permite modelar y crear instancias para resolver problemas lineales o no-lineales utilizando uno de los *solver* soportados por el paquete y PySP, utilizado para resolver problemas estocásticos incorporando, entre otros, Progressive Hedging.

4.2. Módulo PYSP

PySP es una extensión de Pyomo, que abarca herramientas para la formulación y resolución de problemas estocásticos. Permite utilizar la formulación matemática propuesta en este documento para resolver la forma extendida del problema estocástico entero mixto sin problemas, sin embargo, la limitante es el uso de recursos computacionales. Ante estas di-

facultades, PySP incluye herramientas para implementar distintas heurísticas, en particular, incluye un módulo con el código del algoritmo Progressive Hedging estudiado en la sección 2.

Para implementar PH es necesario modelar el problema base (determinista) y postular la función objetivo en base a cada etapa del problema estocástico, posteriormente definir escenarios, y variables a las cuales se asigna restricciones de no-anticipatividad en su forma de promedio. Dada la naturaleza general de las restricciones de no-anticipatividad, sólo es necesario declarar cuáles variables deben cumplir no-anticipatividad para que PySP incluya en forma automatizada las filas necesarias al compilar el problema. Como buena práctica, se recomienda detectar las variables derivadas y dejarlas fuera del conjunto de variables no-anticipativas, reduciendo la cantidad de filas del problema a enviar al *solver*.

Los escenarios de precio son incorporados al problema en su forma de árbol, tal como es modelado en este trabajo, se define el vector de precios para cada escenario, sin embargo, cada escenario es asociado con el respectivo set de nodos, para que el algoritmo trabaje con nodos.

Finalmente, un problema estocástico entero mixto puede ser resuelto por un computador con capacidades comerciales de gama baja si incluye menos de 24 nodos. Para incorporar más nodos, se requiere una capacidad de proceso exponencial.

El programa utilizado funciona de la siguiente manera:

Primero, se resuelve el problema determinista para cada escenario (iteración 0 de PH), se guarda la solución como un *warmstart* que permite a la siguiente iteración enviada a *solver* tener un punto de partida. Es posible agrupar los escenarios, según el criterio que el usuario desee, de forma que, cada sub-problema es una forma extendida de un problema menor, por ejemplo: agrupar escenarios que siguen una rama común, desde ahora, se usará el término sub-problema en forma general.

En las siguientes iteraciones, se resuelve el problema penalizado para cada sub-problema. PySP permite al usuario programar modificaciones que interfieran con el flujo de trabajo después de la primera iteración, antes de cada otra iteración, después de resolver todos los sub-problemas, pero antes del paso (8) del pseudocódigo y después del paso (9).

Si se llega a una condición de término, entonces se resuelve una última vez cada sub-problema, usando la última solución encontrada como *warmstart* y se computa los \hat{X} , valores óptimos de cada variable, que para un problema continuo son el óptimo global. Es posible tomar este último *warmstart* y generar la forma extendida del problema, la cual resuelve en un tiempo menor el problema original.

Los criterios de terminación son definidos por el usuario, por defecto, se utiliza el criterio de convergencia promedio normalizado de los términos proximales, esto es básicamente un criterio de suma cuadrática entre la diferencia de cada variable y el promedio de su nodo.

4.3. Implementación

Para implementar el modelo estocástico es necesario definir los parámetros requeridos por el modelo, en archivos que PySP pueda manipular en forma sencilla.

4.3.1. Simulación de Bosque Tipo

En primer lugar, se sigue la estructura de bosque y parámetros para la cosecha y producción entregados por Toncoso et al. [10], para simular un bosque con 100 rodales, el cual es utilizado para calibrar el modelo y realizar experimentos con distintos escenarios.

La instancia base es denominada “Problema Determinista”, en la cual se estima los parámetros para generar un bosque tipo, consistente con el bosque utilizado en el trabajo original [10]. Cada rodal es simulado utilizando las directrices entregadas, bajo un área aleatoria entre 35 y 45 ha con distribución uniforme, bajo un plano cartesiano de $50 \times 100 m^2$. La ubicación de aserraderos y plantas es arbitraria en el mapa generado, para estimar los costes de transporte se utiliza la distancia entre las coordenadas superior izquierda de cada rodal (representado por un cuadrado) y las coordenadas de la celda de cada aserradero y plantas, penalizando el coste de transporte del trabajo original, para representar costes extra de construcción y mantenimiento de caminos.

La figura 4.1 muestra uno de los bosques simulados, el área coloreada representa rodales de distintas clases de edad, las cuales distribuyen en forma uniforme, debido a que el problema original requiere un bosque de edades uniformemente distribuidas para cosechar cada uno de los 25 periodos, manteniendo el volumen de cada clase de edad al final del horizonte de planificación. El bosque es poblado asignando áreas obtenidas con una distribución normal, asignando una edad inicial a cada rodal, procurando que dos rodales contiguos tengan a lo más 1 año de diferencia entre sí y que todos los rodales de la misma edad abarquen un área conjunta. El coste de producción es estimado como el coste promedio anual para un m^3 o *ton* de producto. Para garantizar consistencia, se fija la cota inferior y superior de producción anual para cubrir los costes fijos de cada tipo de planta, según el coste total estimado de producción promedio.

4.3.2. Simulación de Escenarios de Precio

Los escenarios de precio son generados mediante la estimación de 10.000 trayectorias de evolución del precio mensual de pulpa a lo largo de 4 años, partiendo del precio promedio para el año 1.

La figura 4.2 muestra las 10.000 trayectorias mensuales de precio, como se puede apreciar, existe situaciones de precios extremos hacia la cota superior. Sin embargo, no se detecta a simple vista la existencia de cisnes negros (es decir, un caso extremadamente poco probable, en el cual el precio se aleja considerablemente de la media).

Para obtener un cierto número de escenarios de precio, es necesario clasificar las trayectorias. En este trabajo se utiliza la técnica propuesta por Muñoz (2019), en la cual, se decide la cantidad de precios posibles para cada etapa, por ejemplo: 1 el año 1, 10 el año 2, 5 el año 3, 4 el año 4 y 1 el año 5. Para cada diciembre se toma un porcentaje de las trayectorias

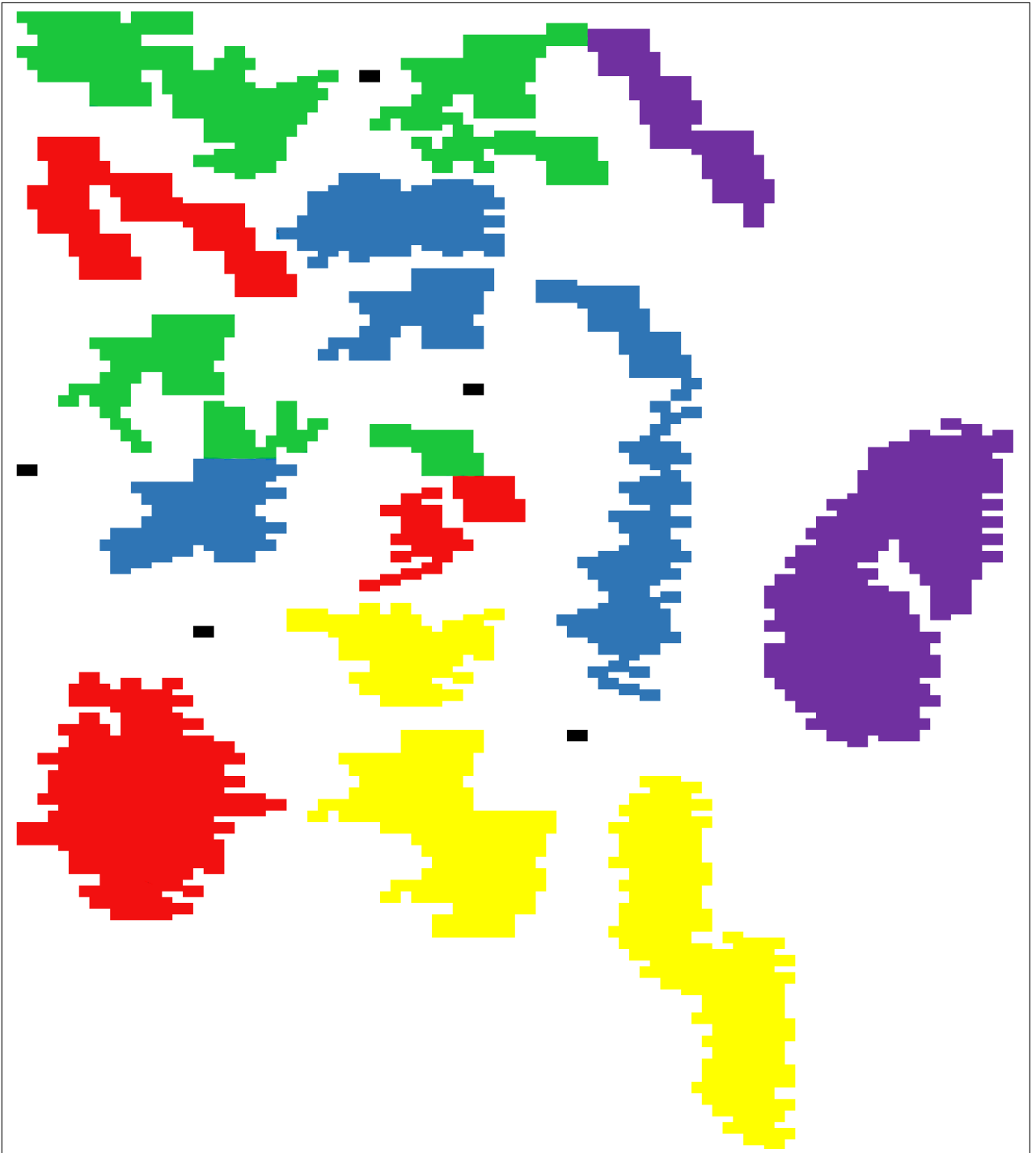


Figura 4.1: Representación gráfica de bosque simulado.

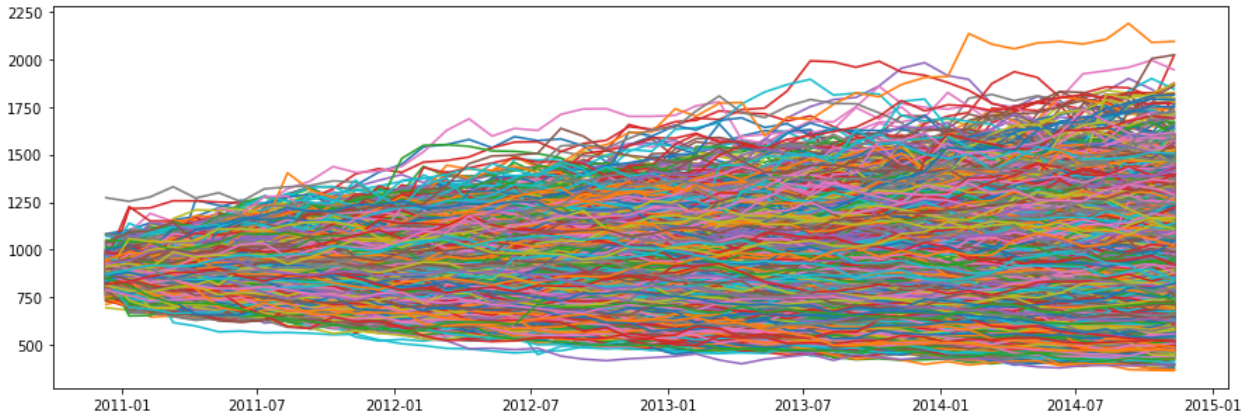


Figura 4.2: Ejemplo de simulación de precios de pulpa, con 10.000 trayectorias de precio.

y se calcula el promedio de los precios predichos. Para el año 2, cada precio corresponde al promedio de 1000 precios, los 1000 más bajos corresponden al precio posible del nodo inferior del periodo, los siguientes 1000 para el segundo nodo.

Para calcular la probabilidad de cada nodo, se calcula la probabilidad condicional de avanzar de un nodo en una etapa, al nodo siguiente. Este cálculo se logra mediante el coeficiente $n_t/n(t-1)$, en palabras simples, la probabilidad de pasar de un nodo del periodo 2 a un nodo del periodo 3, se divide la cantidad de trayectorias que general el promedio del nodo de llegada, dividido la cantidad de trayectorias del nodo de partida (ejemplo: por un nodo de la etapa 2 pasan 1000 trayectorias, de esas trayectorias, 600 pasan por el nodo de llegada en el periodo 3, entonces la probabilidad condicional de pasar por ese trayecto es 0.6). Para calcular la probabilidad de cada escenario, se multiplica las probabilidades condicionales de cada nodo que pertenece a ese escenario.

De la misma forma, PySP utiliza las probabilidades condicionales para construir el árbol de escenarios. Entonces, un escenario de precios queda definido por el set de nodos, junto a su probabilidad condicional.

En este trabajo se utiliza tres sets de escenarios, denominados Instancia 1, Instancia 2 e Instancia 3. Cada uno de ellos es construido con una estructura que permita distintos niveles de proyección hacia el futuro. Con el objetivo de comparar las decisiones del programa de planificación integrada bajo distintos niveles de riesgo.

Instancia 1: Es construida para representar una vista a corto plazo de la predicción de precios, en la cual se permite que el árbol de precios tenga más posibilidades en etapas tempranas, para volver al valor esperado del precio en la etapa 5. Esto se logra indicando 10 posibles precios para la etapa 2, 5 posibilidades de precio para la etapa 3, 2 para la etapa 4 y 1 para la etapa 5. Este tipo de árbol de precios es considerado el que mejor anticipa una alta volatilidad en el corto plazo, seguida de una estabilidad en la economía al largo plazo.

Instancia 2: Es construida para representar una vista con mayor incertidumbre de la predicción de precios, en la cual se permite que el árbol de precios tenga más posibilidades

en etapas terminales. Esto se logra indicando 2 posibles precios para la etapa 2, 3 posibilidades de precio para la etapa 3, 4 para la etapa 4 y 5 para la etapa 5. Este tipo de árbol de precios es considerado el que mejor representa una expectativa de mayor volatilidad en los precios hacia el final del horizonte.

Instancia 3: Es construido para representar una evolución de precios estable, en la cual se espera que los precios no suban ni bajen en forma abrupta. Esto se logra indicando 4 posibles precios para la etapa 2 y 3 en cada etapa restante. Este tipo de árbol de precios es considerado el que mejor representa un riesgo de nivel bajo, dónde se espera que los precios nunca se alejen del valor esperado.

4.4. Uso de la Relajación Lineal

Tras usar resolver el problema estocástico usando Progressive Hedging de Watson y Woodruff [12], mostrada en el apéndice B, se comprueba que el programa encuentra una solución factible en las primeras 10 iteraciones, sin embargo, al comparar con la solución obtenida al resolver el problema en forma extendida para instancias con pocos escenarios (entre 7 y 40) se concluye que el óptimo no converge a la solución (obtenida mediante la resolución de la forma extendida del problema). Sin embargo, al resolver el problema utilizando la relajación lineal de la variable binaria de cosecha, la cota superior obtenida es más cercana a la solución entregada por PH. Como la literatura estudiada no menciona la resolución de problemas enteros mixtos mediante una aproximación de relajación lineal, se decide que es interesante observar el comportamiento de las soluciones a medida que se agregan escenarios a la instancia. Se observa que la cota inferior entregada por PH se aleja del óptimo entregado al resolver la forma extendida, mientras la cota superior entregada por la relajación lineal escoge una estrategia de cosecha y producción similar a la solución de la forma extendida.

Este descubrimiento permite obtener una cota superior para cada variable del problema, que puede ser traducida a una estrategia entera factible. Sin embargo, como el bosque y la división entre rodales es una construcción del planificador, es posible observar el problema desde un punto de vista más práctico: la relajación lineal de la variable de cosecha puede representar el porcentaje cosechado en cada periodo de los rodales. En este caso, se asume que el planificador, tras resolver la relajación lineal del problema, decide cosechar una porción de ciertos rodales, dejando la cosecha de la porción restante para el periodo siguiente.

Tras una revisión del programa de planificación entera mixto, se observa en las restricciones (1) a (5) que si la variable Z_{wit} representa un porcentaje (como un valor en el intervalo $(0, 1)$) de rodal cosechado, las ecuaciones de flujo de transporte mantienen el balance. Además, en la función objetivo esta representación toma en cuenta el crecimiento en volumen de la porción de rodal que no es cosechado inicialmente.

Esta estrategia es denominada *cosecha con rodales dinámicos*, debido a que modificar el área de los rodales *ex-post* la ejecución del programa permite al tomador de decisión mantener un mayor control sobre las decisiones a corto plazo.

La cosecha con rodales dinámicos, además, abre la posibilidad de una planificación forestal en la cual se planifica el tamaño del área a cosechar en áreas de mayor tamaño, las cuales

pueden ser divididas en rodales para toma de decisiones tácticas y construcción de caminos.

En el capítulo 5 se muestra los resultados de las 3 instancias de evolución de precio, construidas para el bosque presentado en la figura 4.1. En las cuales se resuelve el problema de planificación forestal integrada bajo cosecha con rodales dinámicos para distintos niveles de riesgo, representados por el factor de descuento. Económicamente, el factor de descuento representa la confianza que se tiene en que la predicción de precios sea certera, en términos simples, mientras más alta la tasa de descuento, menor será el valor esperado del dinero en el futuro, por lo tanto, menor confianza en la predicción de precios.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se muestra los resultados obtenidos del problema determinista para cada uno de los niveles de factor de descuento: 1 %, 4 % y 8 %. Seguido de los resultados en valor esperado de cada una de las instancias bajo estos factores de descuento. En los cuales se analiza la estrategia de cosecha, destino de distintos tipos de trozo y la venta de pulpa bajo cada una de las instancias y factores de descuento.

5.1. Utilidad Esperada

El apéndice C tabula detalladamente los resultados (en \$USD) obtenidos para cada factor de descuento al resolver el problema determinista. Las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 muestran la utilidad esperada para cada horizonte de planificación, bajo los tres factores de descuento. Por construcción, mientras más alto el factor de descuento, menor es el monto del valor esperado, y mayor es la penalización para periodos terminales del horizonte de planificación (T_A). Los resultados detallados para cada tipo de producto y cada tipo de coste se encuentran en el apéndice C.

	1 % (\$USD)	4 % (\$USD)	8 % (\$USD)
T_B	\$ 55 715 280	\$ 52 634 867	\$ 51 133 183
T_A	\$ 707 118 244	\$ 460 057 527	\$ 287 086 516
<i>Total</i>	\$ 762 833 523	\$ 512 692 393	\$ 338 219 698

Tabla 5.1: Utilidad esperada para el Problema Determinista

Al comparar los resultados entre las instancias estocásticas del problema de planificación con rodales dinámicos y el caso determinista se debe tomar en consideración que el resultado obtenido en en las instancias estocásticas es una cota superior, que además, considera las

mejores decisiones para trayectorias de incremento de precio y trayectorias de reducción de precio. Mientras el problema determinista sólo toma decisiones para el valor esperado del precio de Pulpa.

A grandes rasgos los resultados parciales indican que el estimar distintos escenarios cumple con el objetivo de incrementar el valor esperado de la cadena forestal integrada, en particular, el horizonte de negocios obtiene el mayor incremento en utilidad esperada en las tres instancias en forma consistente.

	1 % (\$USD)	4 % (\$USD)	8 % (\$USD)
T_B	\$ 63 169 931	\$ 58 065 867	\$ 53 098 884
T_A	\$ 700 072 071	\$ 465 622 780	\$ 287 164 521
<i>Total</i>	\$ 763 242 002	\$ 523 688 647	\$ 340 263 405

Tabla 5.2: Utilidad esperada para Instancia 1

	1 % (\$USD)	4 % (\$USD)	8 % (\$USD)
T_B	\$ 63 187 270	\$ 58 301 803	\$ 53 319 567
T_A	\$ 700 217 552	\$ 465 603 430	\$ 287 115 118
<i>Total</i>	\$ 763 404 822	\$ 523 905 233	\$ 340 434 685

Tabla 5.3: Utilidad esperada para Instancia 2

	1 % (\$USD)	4 % (\$USD)	8 % (\$USD)
T_B	\$ 63 177 443	\$ 58 282 687	\$ 53 094 289
T_A	\$ 700 203 738	\$ 465 596 310	\$ 287 378 454
<i>Total</i>	\$ 763 381 181	\$ 523 878 997	\$ 340 472 743

Tabla 5.4: Utilidad esperada para Instancia 3

Al observar los resultados en forma horizontal respecto a los factores de descuento, en la utilidad esperada total, la disminución al aumentar el factor de descuento de 1% a 4% es 32,8% en el escenario determinista y 31% para todas las instancias estocásticas, mientras la disminución al aumentar el factor de descuento de 4% a 8% es, respectivamente 34% y 35% para el escenario determinista y las tres instancias estocásticas. Para el horizonte de anticipación se puede apreciar un comportamiento similar en la disminución de utilidad entre factores de descuento, siendo 34,5% para el escenario determinista y 33,5% para todas las instancias estocásticas al aumentar de 1% a 4%. Al aumentar el factor de descuento de 4% a 8% la disminución en utilidad es 37,6% para el caso determinista y 38% para todas las instancias estocásticas.

En cambio, para el horizonte de negocio, la disminución en utilidad del escenario determinista es 5,5% y 2,85%, en las instancias estocásticas la utilidad esperada entre los factores de descuento 1% y 4% disminuye entre 7,7% y 8%, siendo menor para la instancia 2 y mayor para la instancia 1. Entre los factores de descuento 4% y 8% la disminución es 8,6% para las instancias 1 y 2, y 8,9% para la instancia 3.

Dado que la disminución de utilidad esperada es similar en la utilidad total y en la utilidad del horizonte estocástico para cada uno de los 4 casos, mientras se presenta una disminución más pronunciada en el horizonte de negocio para las instancias estocásticas. Aparentemente, este incremento se puede explicar en una mayor utilidad esperada en el horizonte de negocio para las instancias estocásticas bajo los factores de descuento 1% y 4%. Como estos resultados abarcan el valor esperado de toda la instancia, se estudia los resultados para los 10 escenarios con mejores evoluciones de precio (principalmente al alza) y los 10 escenarios con peor evolución de precio (principalmente a la baja).

Por otro lado, es interesante comparar las decisiones tomadas por el problema estocástico en cada una de las instancias con las decisiones obtenidas del problema determinista con un escenario promedio. La figura 5.1 muestra una matriz de utilidad esperada para el horizonte de negocio en cada instancia, para tres grupos de escenarios: Escenarios superiores corresponde al valor esperado (promedio ponderado) de los 10 escenarios con mejores precios de pulpa, es decir, cuando tiene tendencia al alza, mientras Escenarios inferiores corresponde al valor esperado de los 10 escenarios con mayor tendencia a la baja. En las columnas "Determinista" se calcula la utilidad esperada que habría obtenido el tomador de decisión de haber ejecutado el plan de cosecha y producción entregado por el caso determinista, es decir, los costes corresponden a los costes del escenario promedio, mientras los ingresos son calculados con la producción obtenida en el escenario promedio, utilizando los precios de pulpa de cada escenario. Como la diferencia vista anteriormente, para el horizonte total y el horizonte de anticipación alcanza diferencias del 2%, respecto al problema determinista se estudia con detención qué ocurre en el horizonte de negocios, en el cual las variaciones son mayores.

Como se puede observar, los mayores incrementos en utilidad esperada corresponden a los resultados bajo un factor de descuento del 1%. Mientras para factores de descuento superiores las decisiones estocásticas siguen obteniendo un mejor valor esperado. Que esta diferencia sea mayor, en términos porcentuales, a la diferencia de la utilidad durante todo el horizonte y la utilidad en el horizonte de anticipación responde a que el horizonte de anticipación abarca el 80% del horizonte total, junto a una estimación de costes e ingresos positivista. Para analizar

	Utilidad Esperada de las Decisiones (Factor de Descuento 1%)			Utilidad Esperada de las Decisiones (Factor de Descuento 4%)			Utilidad Esperada de las Decisiones (Factor de Descuento 8%)		
	Estocástico	Determinista	Diferencia (%)	Estocástico	Determinista	Diferencia (%)	Estocástico	Determinista	Diferencia (%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 69 479 438	\$ 61 801 706	(11%)	\$ 64 418 777	\$ 59 490 425	(8%)	\$ 58 958 915	\$ 56 437 303	(4%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 63 169 931	\$ 55 664 362	(12%)	\$ 58 065 867	\$ 53 629 766	(8%)	\$ 53 098 884	\$ 51 091 545	(4%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 57 806 703	\$ 50 053 570	(13%)	\$ 52 598 085	\$ 48 277 260	(8%)	\$ 48 005 303	\$ 46 216 631	(4%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 70 596 359	\$ 62 550 865	(11%)	\$ 65 187 402	\$ 58 912 455	(10%)	\$ 59 504 520	\$ 55 176 028	(7%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 63 187 270	\$ 55 720 807	(12%)	\$ 58 301 803	\$ 52 640 244	(10%)	\$ 53 319 567	\$ 49 529 753	(7%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 56 385 536	\$ 49 239 037	(13%)	\$ 52 052 340	\$ 46 684 786	(10%)	\$ 47 640 973	\$ 44 164 067	(7%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 70 526 566	\$ 62 723 740	(11%)	\$ 65 234 467	\$ 57 357 056	(12%)	\$ 59 508 458	\$ 53 814 864	(10%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 63 177 443	\$ 55 723 783	(12%)	\$ 58 282 687	\$ 51 009 404	(12%)	\$ 53 094 289	\$ 48 210 797	(9%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 56 370 604	\$ 49 099 708	(13%)	\$ 51 891 985	\$ 45 005 061	(13%)	\$ 47 191 132	\$ 42 912 668	(9%)

Figura 5.1: Incremento en la utilidad esperada de cada instancia estocástica, respecto a las decisiones del PD.

qué es lo que logra el programa estocástico con rodajes dinámicos, es necesario observar las ventas y decisiones de asignación de trozos, para determinar cómo es posible lograr una mayor utilidad esperada al preparar una estrategia bajo escenarios discretos.

5.2. Ingresos por Venta versus Costes

En el apéndice D se muestra un resumen más detallado de ingresos por venta de pulpa y los otros productos finales, junto a costes en el horizonte de negocio. Se compara el resultado de la instancia determinista con los 10 escenarios superiores, los 10 escenarios inferiores y el valor esperado de la instancia.

Esta sección presenta tablas resumen de la información mostrada en el apéndice D, que contienen información detallada para el resultado obtenido en ingresos por venta de productos pulpables, separado de la venta de otros productos, costes totales por periodo y utilidad esperada en cada periodo. Todos los valores traídos a valor presente según cada uno de los factores de descuento aplicados al resolver el problema. Los valores representados en esta sección se encuentran en \$USD.

La figura 5.2 muestra en forma tabular los resultados para la Instancia 1, en la cual se observa, en primer lugar la influencia del factor de descuento en la magnitud del resultado. En segundo lugar, para este set de escenarios, se observa un aumento en las ventas de otros productos, distintos al pulpable al comparar los mejores escenarios con el valor esperado de la instancia y los peores escenarios, siendo consistente a todos los factores de descuento el aumento al estar en peores precios esperados de pulpa.

La figura 5.3 muestra en forma tabular los resultados para la Instancia 2. En comparación con la figura 5.2, los resultados en esta instancia muestran mayores ingresos por venta de pulpa consistentemente en todos los niveles de factor de descuento, para el promedio ponderado de toda la instancia sin embargo, en los 10 escenarios superiores e inferiores el ingreso por venta de pulpa es menor para la Instancia 2.

	Productos Pulpables	Otros Productos	Ingreso Total	Costes	Utilidad Esperada
Factor de Descuento 1%					
Instancia Determinista	\$ 57 143 717	\$ 40 879 727	\$ 98 023 444	\$ 42 308 165	\$ 55 715 279
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 74 423 806	\$ 42 192 892	\$ 116 616 698	\$ 47 137 260	\$ 69 479 438
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 59 892 055	\$ 46 704 931	\$ 106 596 986	\$ 43 427 055	\$ 63 169 931
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 51 866 351	\$ 48 212 081	\$ 100 078 432	\$ 42 271 730	\$ 57 806 703
Factor de Descuento 4%					
Instancia Determinista	\$ 54 483 102	\$ 39 119 081	\$ 93 602 183	\$ 40 967 317	\$ 52 634 867
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 71 223 960	\$ 38 360 796	\$ 109 584 756	\$ 45 165 979	\$ 64 418 777
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 57 175 363	\$ 42 431 990	\$ 99 607 353	\$ 41 541 486	\$ 58 065 867
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 49 382 620	\$ 43 643 061	\$ 93 025 681	\$ 40 427 596	\$ 52 598 085
Factor de Descuento 8%					
Instancia Determinista	\$ 50 832 311	\$ 37 929 924	\$ 88 762 235	\$ 37 629 052	\$ 51 133 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 65 850 724	\$ 34 779 746	\$ 100 630 470	\$ 41 671 555	\$ 58 958 915
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 52 954 536	\$ 38 689 022	\$ 91 643 558	\$ 38 544 674	\$ 53 098 884
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 45 980 275	\$ 39 675 414	\$ 85 655 689	\$ 37 650 386	\$ 48 005 303

Figura 5.2: Resumen resultado para Instancia 1, conteniendo ventas, costes y utilidad.

Este efecto es acompañado por un movimiento inverso en la venta de otros productos, cuando una instancia vende más pulpa, vende menos de otros productos, respecto a la otra instancia. Acompañando este factor, los costes disminuyen junto a la disminución de venta de pulpa.

En general, los mejores 10 escenarios de la instancia 2 obtienen consistentemente mejores resultados en venta total y en utilidad. mientras los peores 10 escenarios muestran una protección ante la baja de precios mediante disminución de costes, amortiguando la disminución en la utilidad, pero no alcanzando a obtener mejor resultado que en la instancia 1.

Esta comparación carece de un análisis que toma en cuenta las diferencias en decisiones debido a la diferencia fundamental en la estructura del árbol de precios en ambas instancias, sin embargo la diferencia existe y se refleja en una mayor utilidad esperada.

	Productos Pulpables	Otros Productos	Ingreso Total	Costes	Utilidad Esperada
Factor de Descuento 1%					
Instancia Determinista	\$ 57 143 717	\$ 40 879 727	\$ 98 023 444	\$ 42 308 165	\$ 55 715 279
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 74 138 623	\$ 42 963 706	\$ 117 102 328	\$ 46 505 969	\$ 70 596 359
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 60 414 091	\$ 46 390 404	\$ 106 804 495	\$ 43 617 225	\$ 63 187 270
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 49 906 773	\$ 48 387 817	\$ 98 294 590	\$ 41 909 054	\$ 56 385 536
Factor de Descuento 4%					
Instancia Determinista	\$ 54 483 102	\$ 39 119 081	\$ 93 602 183	\$ 40 967 317	\$ 52 634 867
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 70 323 896	\$ 39 258 505	\$ 109 582 401	\$ 44 394 999	\$ 65 187 402
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 57 525 086	\$ 42 355 288	\$ 99 880 374	\$ 41 578 571	\$ 58 301 803
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 47 870 880	\$ 44 113 951	\$ 91 984 831	\$ 39 932 491	\$ 52 052 340
Factor de Descuento 8%					
Instancia Determinista	\$ 50 832 311	\$ 37 929 924	\$ 88 762 235	\$ 37 629 052	\$ 51 133 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 64 935 373	\$ 35 759 669	\$ 100 695 042	\$ 41 190 523	\$ 59 504 520
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 53 626 348	\$ 38 475 037	\$ 92 101 385	\$ 38 781 818	\$ 53 319 567
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 44 959 671	\$ 40 004 431	\$ 84 964 102	\$ 37 323 129	\$ 47 640 973

Figura 5.3: Resumen resultado para Instancia 2, conteniendo ventas, costes y utilidad.

La figura 5.4 comparada con la figura 5.3 muestra un incremento en ventas para todos los grupos de escenarios y factores de descuento, sin embargo, las diferencias de utilidad esperada son apenas notorias y por debajo del 0,1 %. Por otro lado, al comparar con la figura 5.2 se aprecia que sólo la utilidad esperada de los mejores 10 escenarios es mayor a la de su correspondiente en la instancia 1.

Este análisis muestra que la Instancia 1 y 2 toman distintas decisiones según los casos posibles entregados al problema. Pero la Instancia 3 muestra que una cantidad similar de casos posibles para cada periodo no altera notablemente el valor esperado obtenido, a pesar de alterar los ingresos por venta hacia arriba. Es posible que una instancia con más escenarios generados como la Instancia 3 pueda entregar mejores decisiones, desde el punto de vista de estrategia enfocada en ventas.

	Productos Pulpables	Otros Productos	Ingreso Total	Costes	Utilidad Esperada
Factor de Descuento 1%					
Instancia Determinista	\$ 57 143 717	\$ 40 879 727	\$ 98 023 444	\$ 42 308 165	\$ 55 715 279
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 75 926 630	\$ 41 954 627	\$ 117 881 257	\$ 47 354 691	\$ 70 526 566
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 61 399 134	\$ 45 853 149	\$ 107 252 283	\$ 44 074 840	\$ 63 177 443
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 50 058 374	\$ 48 327 817	\$ 98 386 191	\$ 42 015 587	\$ 56 370 604
Factor de Descuento 4%					
Instancia Determinista	\$ 54 483 102	\$ 39 119 081	\$ 93 602 183	\$ 40 967 317	\$ 52 634 867
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 72 254 008	\$ 38 255 172	\$ 110 509 180	\$ 45 274 713	\$ 65 234 467
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 58 500 997	\$ 41 820 195	\$ 100 321 191	\$ 42 038 504	\$ 58 282 687
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 47 945 202	\$ 43 986 385	\$ 91 931 586	\$ 40 039 602	\$ 51 891 985
Factor de Descuento 8%					
Instancia Determinista	\$ 50 832 311	\$ 37 929 924	\$ 88 762 235	\$ 37 629 052	\$ 51 133 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 66 271 153	\$ 35 022 764	\$ 101 293 917	\$ 41 785 458	\$ 59 508 458
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 54 819 842	\$ 37 653 762	\$ 92 473 604	\$ 39 379 316	\$ 53 094 289
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 45 473 288	\$ 39 433 056	\$ 84 906 344	\$ 37 715 212	\$ 47 191 132

Figura 5.4: Resumen resultado para Instancia 3, conteniendo ventas, costes y utilidad.

5.3. Destino de trozos bajo cada instancia

Para analizar el destino de madera, se compara el volumen total dedicado en cada periodo a trozos pulpables y aserrables con el total de la cosecha. Lo importante es analizar como cada instancia decide si utilizar patrones que priorizan productos aserrables o pulpables. También se menciona los casos en los cuales esto interfiere en las ventas y utilidad esperada.

Esta sección basa el análisis en la data mostrada en el apéndice E, en la cual se observa que para todas las instancias el volumen total cosechado aumenta al incrementar el factor de descuento, específicamente, aumenta más en periodos tempranos del horizonte. Este aumento se explica mediante la urgencia que genera la depreciación estimada debido al factor de descuento, al aumentar el factor de descuento, el valor de los trozos en etapas iniciales se ve menos afectado por el incremento en el descuento.

Se observa un comportamiento consistente en todas las instancias: los escenarios con mejores precios de pulpa dedican mayor porcentaje de la cosecha a productos pulpables, mientras los escenarios con los peores precios destinan un mayor porcentaje de la cosecha total a productos aserrables, en general, el volumen de la cosecha destinado a otros tipos de trozo no varía, cuando el resultado decide cosechar menos trozos pulpables, aumenta el volumen de trozos aserrables.

La figura ?? muestra en un código de colores la distribución de volumen pulpable por periodo para cada par (Instancia, Factor de Descuento). Cada valor representa el porcentaje de la cosecha en ese periodo destinado a trozos pulpables, el color verde representa el periodo con mayor asignación en el cuadrante, el color rojo representa la menor asignación.

		Factor de Descuento 1%					Factor de Descuento 4%					Factor de Descuento 8%				
		T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
Instancia 1	Instancia Determinista	(46,32%)	(38,08%)	(27,95%)	(28,61%)	(56,06%)	(23,00%)	(18,38%)	(17,57%)	(15,68%)	(19,73%)	(23,00%)	(18,51%)	(17,72%)	(16,04%)	(19,83%)
	Promedio Ponderado Escenarios Superiores	(23,00%)	(41,72%)	(34,87%)	(29,58%)	(19,23%)	(23,00%)	(41,78%)	(34,95%)	(29,81%)	(19,79%)	(23,00%)	(41,85%)	(35,25%)	(28,06%)	(19,41%)
	Promedio Ponderado Instancia Estocástica	(23,00%)	(20,55%)	(22,22%)	(24,77%)	(18,66%)	(23,00%)	(20,73%)	(22,31%)	(24,16%)	(19,72%)	(23,00%)	(20,84%)	(22,68%)	(22,62%)	(19,16%)
	Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	(23,00%)	(18,00%)	(17,27%)	(18,08%)	(18,16%)	(23,00%)	(18,39%)	(17,69%)	(17,13%)	(19,72%)	(23,00%)	(18,50%)	(18,10%)	(16,21%)	(19,69%)
Instancia 2	Promedio Ponderado Escenarios Superiores	(23,00%)	(18,91%)	(41,17%)	(32,41%)	(31,33%)	(23,00%)	(18,38%)	(41,21%)	(33,53%)	(31,83%)	(23,00%)	(18,50%)	(41,49%)	(33,72%)	(32,79%)
	Promedio Ponderado Instancia Estocástica	(23,00%)	(18,91%)	(25,43%)	(21,79%)	(22,72%)	(23,00%)	(18,38%)	(25,49%)	(21,77%)	(22,31%)	(23,00%)	(18,51%)	(25,83%)	(21,74%)	(23,50%)
	Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	(23,00%)	(18,91%)	(17,53%)	(15,72%)	(15,68%)	(23,00%)	(18,38%)	(17,57%)	(14,58%)	(15,37%)	(23,00%)	(18,51%)	(17,98%)	(14,16%)	(16,32%)
Instancia 3	Promedio Ponderado Escenarios Superiores	(23,00%)	(23,48%)	(39,97%)	(36,06%)	(36,03%)	(23,00%)	(24,29%)	(40,04%)	(36,11%)	(36,45%)	(23,00%)	(20,39%)	(42,19%)	(36,89%)	(36,38%)
	Promedio Ponderado Instancia Estocástica	(23,00%)	(19,97%)	(25,43%)	(23,97%)	(25,66%)	(23,00%)	(19,86%)	(25,49%)	(23,92%)	(25,40%)	(23,00%)	(20,39%)	(28,18%)	(24,64%)	(25,49%)
	Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	(23,00%)	(18,72%)	(17,31%)	(16,03%)	(16,93%)	(23,00%)	(18,38%)	(17,57%)	(15,04%)	(16,55%)	(23,00%)	(20,39%)	(20,59%)	(14,73%)	(16,50%)

Figura 5.5: Matriz de asignación de volumen pulpable para cada grupo de escenarios estudiado, dentro de cada instancia.

El resultado determinista dedica 39 % de la cosecha total a material pulpable bajo un factor de descuento de 1 %, el volumen de trozos pulpables baja al 19 % de la cosecha total al aumentar el valor del factor de descuento. Los mejores 10 escenarios en todos los pares (Instancia, Factor de Descuento) dedican alrededor de un 30 % de la cosecha total a trozos pulpables, mientras los peores 10 escenarios dedican alrededor de un 20 % del total cosechado.

Si bien, el PD asigna una mayor porción de cosecha para el primer y último periodo, el comportamiento en cada instancia es fascinante. En primer lugar, la distribución de cosecha se mantiene para cada instancia independiente del factor de descuento, manteniendo los periodos en los cuales se asigna el mayor y menor porcentaje a trozos pulpables.

Para la instancia 1, se observa que la asignación de trozos pulpables es consistente con los precios de pulpa para los escenarios superiores e inferiores. Por no-anticipatividad, el primer periodo refleja el porcentaje de trozos pulpables que balancea prevención de baja de precios con la probabilidad de alza. Para el caso del valor esperado de cosecha en la instancia, el mayor porcentaje de trozos pulpables se ve reflejado en los periodos 4 y 1.

Para la instancia 2, el resultado es completamente diferente en los escenarios superiores (el volumen pulpable sube en el segundo periodo, luego baja) comparados con los inferiores (el volumen pulpable baja hasta el periodo 4, luego depende del factor de descuento si baja o sube), En este caso, el valor esperado del volumen cosechado se concentra en el periodo 3. Junto a los datos de ingresos por venta se observa que en esta instancia, la decisión de cosechar más trozos aserrables se refleja en mayores ingresos totales en el periodo, desde un punto de vista financiero, el problema decide utilizar una estrategia de apalancamiento, apostando por venta de productos libres de riesgo (pues los productos aserrables tienen precio fijo).

Dado que el mismo tipo de comportamiento se observa en las decisiones de la instancia 3, es seguro concluir que el problema estocástico de planificación forestal integrado con rodales dinámicos entrega una solución que puede ser interpretada como un portafolio de inversión, en el cual hay activos con riesgo (en este caso, Pulpa) y activos libres de riesgo (productos aserrables), la estrategia de inversión corresponde al porcentaje del volumen cosechado asignado a cada producto.

El apéndice F muestra la relación entre clase de edad, periodo promedio de cosecha y volumen total cosechado para cada instancia y factor de descuento. Se observa que la edad promedio de los rodales al momento de cosecha es alrededor de 30 %, salvo las excepciones de la Instancia 1 para el Factor de Descuento 8 %, el cual presenta el mayor volumen cosechado durante el horizonte de negocio en todas las instancias y factores de descuento, que también se ve reflejado en el periodo de cosecha promedio. Confirmando las observaciones anteriores, al aumentar el factor de descuento, el periodo de cosecha promedio baja para todas las clases de edad, i.e. se adelanta la cosecha.

Un aspecto importante a tomar en consideración al observar las tablas del apéndice F, es que durante el horizonte de negocios se cosecha rodales clase C5 y C4.

Capítulo 6

Conclusión

Como conclusión del análisis de utilidad esperada visto en la sección 5.1, el incorporar estocasticidad a la planificación forestal integrada logra incrementar el valor esperado de la cadena de valor, respecto a utilizar la versión determinista del modelo, usando precios estimados con la técnica del promedio ponderado de un conjunto finito de escenarios junto a su probabilidad (Caso Determinista). Si bien, la utilidad esperada total del horizonte de planificación obtiene variaciones inferiores al 2

Este tipo de problema tiene un diseño particular, toda la cadena de valor se mueve según la demanda y el precio, debido a que se encuentra integrada verticalmente las variaciones en un precio afectan la estrategia de cosecha y destino de los troncos en cada periodo. Esto permite que se pueda enfrentar decisiones bajo incertidumbre modificando el flujo de materia prima, a diferencia de una estrategia desacoplada, en la cual se planifica los niveles de producto final vendido en base a los insumos disponibles esperados. Este trabajo muestra que es posible mantener el volumen cosechado y afrontar cambios en los precios de pulpa destinando más madera a productos aserrables, maximizando la utilidad por venta, mientras se produce pulpa en base al reciclaje de co-productos. Lo que implica una oportunidad para la industria de aprovechar al máximo astillas y aserrín.

Por otro lado, se descubre que la naturaleza de este problema cae en la categoría que genera mayores dificultades al trabajar con el algoritmo PH, en comparación a los resultados encontrados en País (2014), en el cual se estudia la estocasticidad en el crecimiento del bosque, donde PH logra obtener óptimos globales, debido a que la estocasticidad no incide directamente en la función objetivo, pues el volumen a talar en cada periodo sólo incide en las restricciones.

La relajación lineal de este problema también aprovecha el hecho que se trabaja con un volumen que debe ser distribuido cada periodo entre distintos aserraderos y plantas, indicio de que la planificación forestal integrada no requiere variables del tipo “Se cosecha durante el periodo t o no”, en vez de eso, usar variables tipo “volumen cosechado en el periodo t ”. Para futuras investigaciones, se propone incluir construcción y mantención de caminos, aglomeración de rodales (en vez de trabajar con miles de rodales, trabajar con variables continuas permite se puede clusterizar macro-rodales) para planificar cuánto volumen cosechar en un

área mayor de bosque, dejando las decisiones tácticas de cómo cosechar a un modelo de planificación que recibe demanda desde el planificador de la cadena integrada. Otra posible mejora al modelo es la incorporación de estocasticidad correlacionada al precio de productos aserrables, los cuales en la práctica varían junto al precio de la pulpa.

Es importante destacar que la estrategia que presenta el resultado analizado en este trabajo asume precios constantes para los productos aserrables, en términos financieros, son un apalancamiento. El problema resuelve vender más aserrables cuando el precio de pulpa baja, debido a que es una estrategia que no tiene incorporado riesgo. Entonces, que los precios de productos aserrables no cambien entre escenarios puede explicar el incremento en utilidad, lo que abre la pregunta ¿Cuáles son las diferencias entre aislar estocasticidad en un tipo de producto, versus incorporar incertidumbre en forma sistémica sobre los precios?

Este último hallazgo es importante para el diseño de estrategias para resolver problemas estocásticos, en particular que incorporen distintos tipos de producto. Tal como se estudia en el ámbito de las inversiones, un portafolio es más seguro a medida que incorpora más activos libres de riesgo, en este caso, los productos aserrables son libres de riesgo. Viendo la estrategia de cosecha como un portafolio, es natural pensar en algún tipo de apalancamiento para incrementar la utilidad esperada. Otro tipo de apalancamiento es la compra de troncos pulpables, si se permite compra de troncos a una empresa externa a un precio pactado al inicio del horizonte (un contrato tipo opción) ¿Aumentará la utilidad esperada?, este tópico de investigación incorporaría manejo de activos y opciones a la planificación forestal.

Otro hallazgo importante es que el factor de descuento no altera la estrategia, pero si el resultado esperado, produciendo un gap menor entre el resultado de la estrategia determinista versus cada escenario. Esto se debe a que, matemáticamente hablando, una tasa de descuento del 1

Respecto a la forma de construir los niveles de precio para los escenarios, se recomienda estimar más posibilidades en las primeras etapas a incorporar estocasticidad y evitar instancias planas (con la misma cantidad de niveles de precio para cada etapa), debido a que esa instancia es más parecida al promedio, generando escenarios que ignoran casos extremos, en particular cisnes negros. Este último caso, estima un futuro en el cual es muy probable que el precio no suba ni baje mucho, por lo tanto, se cosecha más que en el caso promedio, para que la posibilidad de que el precio suba genere ingresos que compensen la posible baja en los precios. Este comportamiento puede ser explicado fácilmente observando la ilustración 5, en la cual el área de trayectorias de precio estimada se encuentra un poco más abierta hacia arriba que hacia abajo, por lo tanto, generar escenarios con pocas posibilidades de precio para todos los periodos parece ser una trampa, en la cual se sobre estima la cantidad de escenarios de precio alto.

Finalmente, se espera que este trabajo sirva como guía para futuras investigaciones, tanto en programación estocástica y el uso de relajación lineal. Como para futuras modificaciones para el modelo de planificación forestal integrado.

Using hyperref, one should say:

Bibliografía

- [1] Sophie D’Amours, Mikael Rönnqvist, and Andres Weintraub. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 46(4):265–281, 2008.
- [2] Jon Danielsson. Stochastic volatility in asset prices estimation with simulated maximum likelihood. *Journal of Econometrics*, 64(1-2):375–400, 1994.
- [3] Corporación Chilena de la Madera. Aportes a la economía: Chile en el mercado mundial. Disponible en: <https://www.corma.cl/perfil-del-sector/aportes-a-la-economia/chile-en-el-mercado-mundial/> (18-08-2019).
- [4] Ana Janina Gysling Caselli, Verónica Alvarez González, Daniel Alberto Soto Aguirre, V Pardo, Pamela Poblete, et al. Anuario forestal 2018. 2017.
- [5] William E Hart, Carl D Laird, Jean-Paul Watson, David L Woodruff, Gabriel A Hacke-beil, Bethany L Nicholson, and John D Siirola. *Pyomo-optimization modeling in python*, volume 67. Springer, 2017.
- [6] Alan J King and Stein W Wallace. *Modeling with stochastic programming*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] Cristóbal Pais Martínez. Complete stochastic forestry planning problem using progressive hedging algorithm. 2014.
- [8] R Tyrrell Rockafellar and RJ-B Wets. Nonanticipativity and l 1-martingales in stochastic optimization problems. In *Stochastic Systems: Modeling, Identification and Optimization, II*, pages 170–187. Springer, 1976.
- [9] Arauco S.A. Reporte de sostenibilidad 2016. Disponible en: <https://www.arauco.cl/wp-content/uploads/2017/07/Reporte-Sostenibilidad-2016.pdf> (11-03-2019).
- [10] Juan Troncoso, Sophie D’Amours, Patrik Flisberg, Mikael Rönnqvist, and Andrés Weintraub. A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain — a case study in the chilean forest industry. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7):937–949, 2015.
- [11] Fernando Badilla Veliz, Jean-Paul Watson, Andres Weintraub, Roger J-B Wets, and David L Woodruff. Stochastic optimization models in forest planning: a progressive

hedging solution approach. *Annals of Operations Research*, 232(1):259–274, 2015.

- [12] Jean-Paul Watson and David L Woodruff. Progressive hedging innovations for a class of stochastic mixed-integer resource allocation problems. *Computational Management Science*, 8(4):355–370, 2011.

Apéndice A

Resumen de precios posibles en Instancias

A.1. Valores de precios en Instancia 1

Esta instancia contiene 99 escenarios, cada uno representa una trayectoria en los siguientes precios posibles:

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
	$P_0 = 779$			
	$P_1 = 714$			
	$P_2 = 922$	$P_0 = 700$		
	$P_3 = 953$	$P_1 = 805$	$P_0 = 754$	
$P_0 = 881$	$P_4 = 894$	$P_2 = 879$		$P_0 = 904$
	$P_5 = 869$	$P_3 = 959$	$P_1 = 1039$	
	$P_6 = 996$	$P_4 = 1113$		
	$P_7 = 814$			
	$P_8 = 843$			
	$P_9 = 1083$			

Tabla A.1: Precios de Pulpa simulados en cada etapa de la Instancia 1

A.2. Valores de precios en Instancia 2

Esta instancia contiene 103 escenarios, cada uno representa una trayectoria en los siguientes precios posibles:

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
				$P_0 = 640$
			$P_0 = 686$	
		$P_0 = 739$		$P_1 = 779$
	$P_0 = 805$		$P_1 = 827$	
$P_0 = 881$		$P_1 = 884$		$P_2 = 880$
	$P_1 = 969$		$P_2 = 938$	
		$P_2 = 1057$		$P_3 = 995$
			$P_3 = 1142$	
				$P_4 = 1229$

Tabla A.2: Precios de Pulpa simulados en cada etapa de la Instancia 2

A.3. Valores de precios en Instancia 3

Esta instancia contiene 105 escenarios, cada uno representa una trayectoria en los siguientes precios posibles:

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
	$P_0 = 761$			
		$P_0 = 739$	$P_0 = 712$	$P_0 = 689$
	$P_1 = 850$			
$P_0 = 881$		$P_1 = 884$	$P_1 = 881$	$P_1 = 880$
	$P_2 = 914$			
		$P_2 = 1057$	$P_2 = 1101$	$P_2 = 1144$
	$P_3 = 1024$			

Tabla A.3: Precios de Pulpa simulados en cada etapa de la Instancia 3

Apéndice B

Heurística Progressive Hedging

B.1. Progressive Hedging (PH)

La resolución de problemas estocásticos enteros mixtos requiere una cantidad creciente en forma exponencial dependiendo de la cantidad de nodos en el árbol de escenarios. Para resolver estos problemas se ha introducido en la literatura varios algoritmos y estrategias, tales como relajación lagrangiana y Progressive Hedging, el cual es descartado para su uso en este trabajo. En este apéndice se incorpora una breve explicación del algoritmo, junto a las referencias correspondientes.

Este algoritmo consiste en relajar las variables de no-anticipatividad para forzar la convergencia de las variables bajo la formulación promedio, para cada nodo del árbol de escenarios. Tras cada iteración, el programa obtiene una solución única en todas las variables con restricciones de no-anticipatividad. Esta descomposición permite abordar el problema de escalabilidad en cuanto al uso de recursos computacionales debido a la cantidad de columnas y filas que agregan las restricciones de no anticipatividad, asociadas a cada nodo, al problema estocástico extendido. En el cual, el algoritmo es exacto para problemas lineales convexos, sin embargo, para problemas enteros no se garantiza la convergencia al óptimo global.

B.1.1. Función Objetivo

En Pais (2014) [7] se muestra como esta metodología permite resolver el problema estocástico a partir de la resolución de cada uno de los escenarios en forma independiente, y luego calcular la esperanza para el problema estocástico original. En primer lugar, se muestra como transformar la función objetivo del PE en una función independiente para cada escenario:

Al observar las soluciones factibles de un problema extendido, se observa que para la variable x_t cumple para cada nodo $\nu \in N_t$:

$$x_t^{\omega_i} = x_t^{\omega_j}, \quad \forall \omega_i, \omega_j \in \nu \implies x_t^{\omega_i} = \mathbb{E}^\nu(x_t), \quad \forall \omega_i \in \nu \quad (\text{B.1})$$

Que es equivalente a formular las restricciones de no-anticipatividad para cada variable

según la ecuación ??, implicando que las restricciones de no-anticipatividad igualan cada variable a su esperanza aritmética en todos los escenarios del nodo al que pertenece ($\mathbb{E}^\nu(\cdot)$). Pues en una solución factible las variables de distintos escenarios son iguales en cada nodo compartido por ellos generando una dependencia de la solución a los escenarios.

Para trabajar sin esta dependencia entre escenarios, se usa la técnica de descomposición lagrangiana sobre las restricciones. Sean \tilde{w}_ω los penalizadores en la función objetivo representantes de la medida en que la solución devía de la restricción de no-anticipatividad. Sea Q_ω el conjunto solución del escenario $\omega \in \Omega$, la función objetivo para el escenario ω puede ser expresada como:

$$\min_{x_\omega \in Q_\omega} \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \cdot f_\omega(x_\omega) + \sum_{\omega \in \Omega} \tilde{w}_\omega \cdot (x_\omega - \mathbb{E}(x_\omega)) \quad (\text{B.2})$$

Con un cambio de notación ($\tilde{w}_\omega = p_\omega \cdot w_\omega$ y $\mathbb{E}(w) = 0$) y reagrupación de términos:

$$\min_{x_\omega \in Q_\omega} \sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \cdot (f_\omega(x_\omega) + w_\omega \cdot x_\omega) \quad (\text{B.3})$$

Entonces, es posible intercambiar la minimización (o maximización, en este caso) y el cálculo de la esperanza, descomponiendo el problema original en una serie de problemas más sencillos:

$$\sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \cdot \left(\min_{x_\omega \in Q_\omega} f_\omega(x_\omega) + w_\omega \cdot x_\omega \right) \quad (\text{B.4})$$

Una de las desventajas del algoritmo es que la convergencia de los multiplicadores no está garantizada bajo esta formulación, la que se evita sumando (o restando, en el caso de una maximización) un término proximal cuadrático que obliga a las variables a converger a su promedio en el nodo respectivo de cada una. Esta relajación lagrangiana modificada corresponde la diferencia entre la solución obtenida en cada sub-problema respecto al promedio obtenido en cada nodo:

$$\sum_{\omega \in \Omega} p_\omega \cdot \left(\min_{x_\omega \in Q_\omega} f_\omega(x_\omega) + w_\omega \cdot x_\omega + \frac{\rho}{2} (x_\omega - \bar{x}) \right) \quad (\text{B.5})$$

Es importante notar que los multiplicadores pueden generar que alguna de las variables sea no acotada, por ejemplo, con costo total negativo. Entonces el problema no logra converger. En este trabajo se utiliza la formulación B.5 como función objetivo del problema estocástico entero mixto en el algoritmo PH.

B.1.2. Algoritmo utilizado en PH

Este algoritmo utiliza la siguiente formulación generalizada:

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{\omega_i \in \Omega} p_{\omega_i} \cdot f(x, \omega_i) \\
 \text{st.} \quad & x = X_{\omega_i} \in Q_{\omega_i}, \quad \forall \omega_i \in \nu, \forall \nu \in N_t, \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{B.6}$$

Con

X_{ω_i} : vector de valores para cada variable, que cumplen con las restricciones activas del escenario ω_i

Q_{ω_i} : set de restricciones activas del escenario ω_i

El pseudocódigo siguiente, tomado de Badilla et al. (2015) [11], muestra los pasos del algoritmo. A partir de la ecuación B.6, usando la formulación de la función objetivo equivalente mostrada en B.5, se tiene:

- (1) Resolver cada escenario sin penalizaciones, sea k el índice de iteración y w_k la penalización en la iteración k :

$$k = 0, w_k = 0$$

- (2) Calcular el promedio para cada variable:

$$x = \sum_{\omega_i \in \Omega} p_{\omega_i} \cdot x_{\omega_i}$$

- (3) Si las soluciones convergen según la tolerancia, salir; otro caso $k = k + 1$

$$g := \|\bar{x} - x\| < \varepsilon$$

- (4) Actualizar los términos de penalización:

$$w_{k+1} = \rho \cdot (\bar{x}_{\omega_i} - x) + w_k$$

- (5) Resolver el problema para cada escenario con penalizaciones:

$$\bar{f}(x_{\omega_i}, \omega_i) := f(x_{\omega_i}, \omega_i) + w \cdot x_{\omega_i} + \frac{\rho}{2} \|\bar{x} - x_{\omega_i}\|^2$$

- (6) Volver a (2)

Apéndice C

Resultados de optimizar el problema determinista (PD), bajo distintos factores de descuento

C.1. Resultados para Factor de descuento 1%

C.1.1. Parte 1: Horizonte de planificación de Negocio (\$USD)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Total
Ingresos por ventas de productos						
Pulpa	\$ 15 252 166	\$ 13 003 314	\$ 11 129 977	\$ 9 287 192	\$ 8 471 067	\$ 57 143 717
Aserrables	\$ 9 627 467	\$ 9 100 059	\$ 7 935 866	\$ 7 070 583	\$ 5 813 261	\$ 39 547 237
Electricidad	\$ 341 743	\$ 284 705	\$ 241 406	\$ 197 539	\$ 182 088	\$ 1 247 482
Troncos	\$ 26 547	\$ 19 129	\$ 15 793	\$ 11 226	\$ 12 314	\$ 85 009
Valor terminal de Rodales						
Rodales Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Rodales no Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte desde Rodales						
A aserraderos	\$ 309 805	\$ 226 412	\$ 305 643	\$ 199 457	\$ 166 908	\$ 1 208 225
A plantas de Pulpa	\$ 81 472	\$ 54 846	\$ 42 436	\$ 31 939	\$ 32 210	\$ 242 904
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte (co-productos)						
A plantas de Pulpa	\$ 53 047	\$ 49 893	\$ 43 578	\$ 38 639	\$ 31 904	\$ 217 062
A plantas de Electricidad	\$ 29 455	\$ 26 382	\$ 22 616	\$ 19 512	\$ 16 716	\$ 114 680
Costes Operacionales						
Cosecha	\$ 71 899	\$ 64 298	\$ 55 359	\$ 47 661	\$ 41 034	\$ 280 249
Aserraderos	\$ 1 215 973	\$ 1 128 557	\$ 1 001 660	\$ 873 845	\$ 736 785	\$ 4 956 819
Plantas de Pulpa	\$ 9 443 091	\$ 7 996 299	\$ 6 805 938	\$ 5 634 862	\$ 5 105 616	\$ 34 985 806
Plantas de Electricidad	\$ 82 847	\$ 69 019	\$ 58 523	\$ 47 888	\$ 44 143	\$ 302 420
Totales						
Ingresos	\$ 25 247 924	\$ 22 407 207	\$ 19 323 043	\$ 16 566 540	\$ 14 478 730	\$ 98 023 445
Costes	\$ 11 287 589	\$ 9 615 706	\$ 8 335 751	\$ 6 893 803	\$ 6 175 316	\$ 42 308 165
Valor Esperado Total:	\$ 13 960 335	\$ 12 791 501	\$ 10 987 292	\$ 9 672 737	\$ 8 303 415	\$ 55 715 280

Figura C.1: Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 1%, periodos del horizonte de planificación de Negocio (T_B)

C.1.2. Parte 2: Horizonte de planificación de Anticipación (\$USD)

	Periodo 6	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Total	Total Horizonte
Ingresos por ventas de productos						
Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 57 143 717
Aserrables	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 39 547 237
Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 247 482
Troncos	\$ 206 866 709	\$ 192 251 196	\$ 161 178 717	\$ 128 863 989	\$ 689 160 612	\$ 689 245 621
Valor terminal de Rodales						
Rodales Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 17 591 037	\$ 17 591 037	\$ 17 591 037
Rodales no Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 422 571	\$ 1 422 571	\$ 1 422 571
Coste de Transporte desde Rodales						
A aserraderos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 208 225
A plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 242 904
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte (co-productos)						
A plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 217 062
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 114 680
Costes Operacionales						
Cosecha	\$ 314 423	\$ 295 373	\$ 248 861	\$ 197 319	\$ 1 055 976	\$ 1 336 226
Aserraderos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4 956 819
Plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 34 985 806
Plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 302 420
Totales						
Ingresos	\$ 206 866 709	\$ 192 251 196	\$ 161 178 717	\$ 147 877 597	\$ 708 174 220	\$ 806 197 665
Costes	\$ 314 423	\$ 295 373	\$ 248 861	\$ 197 319	\$ 1 055 976	\$ 43 364 141
Valor Esperado Total:	\$ 206 552 286	\$ 191 955 823	\$ 160 929 856	\$ 147 680 278	\$ 707 118 244	\$ 762 833 523

Figura C.2: Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 1 %, periodos del horizonte de planificación de Anticipación (T_A) y Total en el Horizonte de Planificación (T)

C.2. Resultados para Factor de descuento 4 %

C.2.1. Parte 1: Horizonte de planificación de Negocio (\$USD)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Total
Ingresos por ventas de productos						
Pulpa	\$ 15 746 752	\$ 12 416 228	\$ 10 301 737	\$ 8 446 113	\$ 7 572 273	\$ 50 832 311
Aserrables	\$ 9 939 839	\$ 8 878 262	\$ 7 526 206	\$ 6 443 301	\$ 5 061 227	\$ 35 134 109
Electricidad	\$ 352 753	\$ 270 850	\$ 222 513	\$ 179 557	\$ 164 183	\$ 1 111 182
Troncos	\$ 27 408	\$ 17 634	\$ 13 966	\$ 10 169	\$ 11 212	\$ 75 781
Valor terminal de Rodales						
Rodales Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Rodales no Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte desde Rodales						
A aserraderos	\$ 344 167	\$ 228 277	\$ 242 618	\$ 180 642	\$ 142 938	\$ 1 138 641
A plantas de Pulpa	\$ 91 659	\$ 48 826	\$ 34 148	\$ 29 127	\$ 26 710	\$ 230 469
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte (co-productos)						
A plantas de Pulpa	\$ 164 331	\$ 145 993	\$ 123 844	\$ 105 645	\$ 82 667	\$ 622 479
A plantas de Electricidad	\$ 91 269	\$ 76 397	\$ 63 667	\$ 53 299	\$ 44 338	\$ 328 969
Costes Operacionales						
Cosecha	\$ 74 230	\$ 62 065	\$ 51 894	\$ 43 389	\$ 36 279	\$ 267 858
Aserraderos	\$ 1 254 734	\$ 1 100 893	\$ 944 261	\$ 796 461	\$ 621 600	\$ 4 717 949
Plantas de Pulpa	\$ 9 749 304	\$ 7 635 274	\$ 6 299 472	\$ 5 124 550	\$ 4 563 902	\$ 33 372 502
Plantas de Electricidad	\$ 85 516	\$ 65 661	\$ 53 943	\$ 43 529	\$ 39 802	\$ 288 450
Totales						
Ingresos	\$ 26 066 751	\$ 21 582 975	\$ 18 064 422	\$ 15 079 140	\$ 12 808 896	\$ 93 602 183
Costes	\$ 11 855 209	\$ 9 363 384	\$ 7 813 846	\$ 6 376 642	\$ 5 558 235	\$ 40 967 317
Valor Esperado Total:	\$ 14 211 542	\$ 12 219 591	\$ 10 250 576	\$ 8 702 497	\$ 7 250 661	\$ 52 634 867

Figura C.3: Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 4 %, periodos del horizonte de planificación de Negocio (T_B)

C.2.2. Parte 2: Horizonte de planificación de Anticipación (\$USD)

	Periodo 6	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Total	Total Horizonte
Ingresos por ventas de productos						
Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 54 483 102
Aserrables	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 37 848 835
Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 189 856
Troncos	\$ 171 455 068	\$ 125 499 842	\$ 96 536 698	\$ 66 561 669	\$ 460 053 277	\$ 460 133 667
Valor terminal de Rodales						
Rodales Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 10 461 421	\$ 10 461 421	\$ 10 461 421
Rodales no Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 708 853	\$ 708 853	\$ 708 853
Coste de Transporte desde Rodales						
A aserraderos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 138 641
A plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 230 469
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte (co-productos)						
A plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 622 479
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 328 969
Costes Operacionales						
Cosecha	\$ 260 896	\$ 192 608	\$ 149 025	\$ 102 074	\$ 704 603	\$ 972 460
Aserraderos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4 717 949
Plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 33 372 502
Plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 288 450
Totales						
Ingresos	\$ 171 455 068	\$ 125 499 842	\$ 96 536 698	\$ 67 270 522	\$ 460 762 130	\$ 554 364 313
Costes	\$ 260 896	\$ 192 608	\$ 149 025	\$ 102 074	\$ 704 603	\$ 41 671 919
Valor Esperado Total:	\$ 171 194 172	\$ 125 307 234	\$ 96 387 673	\$ 67 168 448	\$ 460 057 527	\$ 512 692 393

Figura C.4: Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 4%, periodos del horizonte de planificación de Anticipación (T_A) y Total en el Horizonte de Planificación (T)

C.3. Resultados para Factor de descuento 8 %

C.3.1. Parte 1: Horizonte de planificación de Negocio (\$USD)

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Total
Ingresos por ventas de productos						
Pulpa	\$ 15 578 139	\$ 11 846 974	\$ 9 464 120	\$ 7 499 002	\$ 6 444 077	\$ 50 832 311
Aserrables	\$ 9 826 717	\$ 8 441 902	\$ 6 895 753	\$ 5 664 222	\$ 4 305 515	\$ 35 134 109
Electricidad	\$ 348 996	\$ 258 554	\$ 204 467	\$ 159 687	\$ 139 478	\$ 1 111 182
Troncos	\$ 27 109	\$ 16 929	\$ 12 935	\$ 9 223	\$ 9 585	\$ 75 781
Valor terminal de Rodales						
Rodales Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Rodales no Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte desde Rodales						
A aserraderos	\$ 338 268	\$ 215 861	\$ 215 966	\$ 160 412	\$ 133 375	\$ 1 063 883
A plantas de Pulpa	\$ 90 734	\$ 47 265	\$ 31 273	\$ 25 643	\$ 21 053	\$ 215 968
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte (co-productos)						
A plantas de Pulpa	\$ 54 139	\$ 46 281	\$ 37 857	\$ 30 967	\$ 23 493	\$ 192 737
A plantas de Electricidad	\$ 30 109	\$ 24 258	\$ 19 451	\$ 15 695	\$ 12 597	\$ 102 110
Costes Operacionales						
Cosecha	\$ 73 420	\$ 59 113	\$ 47 596	\$ 38 322	\$ 30 855	\$ 249 306
Aserraderos	\$ 1 237 154	\$ 1 047 022	\$ 869 499	\$ 700 401	\$ 530 367	\$ 4 384 443
Plantas de Pulpa	\$ 9 644 911	\$ 7 285 215	\$ 5 787 272	\$ 4 549 905	\$ 3 883 924	\$ 31 151 227
Plantas de Electricidad	\$ 84 605	\$ 62 680	\$ 49 568	\$ 38 712	\$ 33 813	\$ 269 377
Totales						
Ingresos	\$ 26 240 590	\$ 20 945 250	\$ 16 886 651	\$ 13 583 526	\$ 11 106 218	\$ 88 762 235
Costes	\$ 11 553 341	\$ 8 787 696	\$ 7 058 482	\$ 5 560 057	\$ 4 669 477	\$ 37 629 052
Valor Esperado Total:	\$ 14 687 250	\$ 12 157 555	\$ 9 828 169	\$ 8 023 469	\$ 6 436 741	\$ 51 133 183

Figura C.5: Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 8 %, periodos del horizonte de planificación de Negocio (T_B)

C.3.2. Parte 2: Horizonte de planificación de Anticipación (\$USD)

	Periodo 6	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Total	Total Horizonte
Ingresos por ventas de productos						
Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 50 832 311
Aserrables	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 35 134 109
Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 111 182
Troncos	\$ 132 767 439	\$ 75 457 728	\$ 48 928 198	\$ 27 655 804	\$ 284 809 169	\$ 284 884 950
Valor terminal de Rodales						
Rodales Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4 011 627	\$ 4 011 627	\$ 4 011 627
Rodales no Cosechados	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 309 398	\$ 309 398	\$ 309 398
Coste de Transporte desde Rodales						
A aserraderos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1 063 883
A plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 215 968
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Coste de Transporte (co-productos)						
A plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 192 737
A plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 102 110
Costes Operacionales						
Cosecha	\$ 201 616	\$ 115 665	\$ 75 006	\$ 42 540	\$ 434 826	\$ 684 132
Aserraderos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 4 384 443
Plantas de Pulpa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 31 151 227
Plantas de Electricidad	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 269 377
Totales						
Ingresos	\$ 134 183 737	\$ 76 154 715	\$ 49 192 322	\$ 27 990 568	\$ 287 521 342	\$ 376 283 576
Costes	\$ 201 616	\$ 115 665	\$ 75 006	\$ 42 540	\$ 434 826	\$ 38 063 878
Valor Esperado Total:	\$ 133 982 121	\$ 76 039 050	\$ 49 117 316	\$ 27 948 029	\$ 287 086 516	\$ 338 219 698

Figura C.6: Resumen resultado problema determinista con factor de descuento 8 %, periodos del horizonte de planificación de Anticipación (T_A) y Total en el Horizonte de Planificación (T)

Apéndice D

Resultados detallados de costes e
ingresos para las instancias del problema
Estocástico

D.1. Resultados para Instancia 1

D.1.1. Parte 1: Resultados bajo factor de descuento 1%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 252 166	\$ 13 003 314	\$ 11 129 977	\$ 9 287 192	\$ 8 471 067	\$ 57 143 717
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 14 960 356	\$ 21 347 293	\$ 16 889 108	\$ 12 712 435	\$ 8 514 614	\$ 74 423 806
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 14 960 356	\$ 12 960 115	\$ 11 784 856	\$ 10 735 381	\$ 9 451 346	\$ 59 892 055
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 14 960 356	\$ 9 705 429	\$ 8 581 366	\$ 8 154 215	\$ 10 464 986	\$ 51 866 351
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 9 995 758	\$ 9 403 893	\$ 8 193 066	\$ 7 279 348	\$ 6 007 663	\$ 40 879 727
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 734 760	\$ 8 386 650	\$ 7 854 262	\$ 7 240 130	\$ 6 977 091	\$ 42 192 892
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 734 760	\$ 10 567 459	\$ 8 967 217	\$ 7 604 581	\$ 7 830 914	\$ 46 704 931
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 734 760	\$ 10 633 437	\$ 9 173 479	\$ 7 898 042	\$ 8 772 363	\$ 48 212 081
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 25 247 924	\$ 22 407 207	\$ 19 323 043	\$ 16 566 540	\$ 14 478 730	\$ 98 023 444
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 26 695 116	\$ 29 733 943	\$ 24 743 370	\$ 19 952 565	\$ 15 491 705	\$ 116 616 698
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 26 695 116	\$ 23 527 575	\$ 20 752 072	\$ 18 339 963	\$ 17 282 260	\$ 106 596 986
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 26 695 116	\$ 20 338 866	\$ 17 754 845	\$ 16 052 257	\$ 19 237 349	\$ 100 078 432
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 287 589	\$ 9 615 706	\$ 8 335 751	\$ 6 893 803	\$ 6 175 316	\$ 42 308 165
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 094 425	\$ 12 025 604	\$ 9 848 109	\$ 7 952 650	\$ 6 216 473	\$ 47 137 260
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 094 425	\$ 9 444 662	\$ 8 473 194	\$ 7 523 792	\$ 6 890 982	\$ 43 427 055
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 094 425	\$ 8 989 164	\$ 7 777 714	\$ 6 772 920	\$ 7 637 507	\$ 42 271 730
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 13 960 335	\$ 12 791 501	\$ 10 987 292	\$ 9 672 737	\$ 8 303 414	\$ 55 715 279
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 600 691	\$ 17 708 339	\$ 14 895 261	\$ 11 999 915	\$ 9 275 232	\$ 69 479 438
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 600 691	\$ 14 082 913	\$ 12 278 878	\$ 10 816 170	\$ 10 391 278	\$ 63 169 931
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 600 691	\$ 11 349 702	\$ 9 977 131	\$ 9 279 337	\$ 11 599 842	\$ 57 806 703

Figura D.1: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 1, factor de descuento al 1%

D.1.2. Parte 2: Resultados bajo factor de descuento 4%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 746 752	\$ 12 416 228	\$ 10 301 737	\$ 8 446 113	\$ 7 572 273	\$ 54 483 102
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 738 005	\$ 20 548 807	\$ 15 791 830	\$ 11 565 499	\$ 7 579 820	\$ 71 223 960
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 738 005	\$ 12 942 236	\$ 11 245 113	\$ 9 686 585	\$ 7 563 425	\$ 57 175 363
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 738 005	\$ 9 972 961	\$ 8 533 756	\$ 7 579 916	\$ 7 557 981	\$ 49 382 620
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 10 320 000	\$ 9 166 747	\$ 7 762 686	\$ 6 633 027	\$ 5 236 623	\$ 39 119 081
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 502 262	\$ 6 986 390	\$ 6 196 475	\$ 5 309 284	\$ 4 871 961	\$ 34 866 372
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 502 262	\$ 9 555 466	\$ 7 533 826	\$ 5 823 094	\$ 5 020 530	\$ 39 435 178
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 502 262	\$ 9 820 815	\$ 8 005 675	\$ 6 462 158	\$ 5 074 941	\$ 40 865 850
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 26 066 751	\$ 21 582 975	\$ 18 064 422	\$ 15 079 140	\$ 12 808 896	\$ 93 602 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 27 240 267	\$ 27 535 197	\$ 21 988 305	\$ 16 874 782	\$ 12 451 781	\$ 106 090 332
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 27 240 267	\$ 22 497 702	\$ 18 778 939	\$ 15 509 678	\$ 12 583 955	\$ 96 610 541
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 27 240 267	\$ 19 793 776	\$ 16 539 431	\$ 14 042 074	\$ 12 632 922	\$ 90 248 470
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 855 209	\$ 9 363 384	\$ 7 813 846	\$ 6 376 642	\$ 5 558 235	\$ 40 967 317
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 536 357	\$ 10 980 550	\$ 8 408 310	\$ 6 265 996	\$ 4 480 342	\$ 41 671 555
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 536 357	\$ 8 997 442	\$ 7 430 681	\$ 5 947 731	\$ 4 632 463	\$ 38 544 674
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 536 357	\$ 8 787 212	\$ 7 075 134	\$ 5 567 361	\$ 4 684 321	\$ 37 650 386
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 14 211 542	\$ 12 219 591	\$ 10 250 576	\$ 8 702 497	\$ 7 250 661	\$ 52 634 867
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 703 909	\$ 16 554 648	\$ 13 579 995	\$ 10 608 786	\$ 7 971 439	\$ 64 418 777
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 703 909	\$ 13 500 260	\$ 11 348 258	\$ 9 561 947	\$ 7 951 492	\$ 58 065 867
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 703 909	\$ 11 006 564	\$ 9 464 297	\$ 8 474 713	\$ 7 948 601	\$ 52 598 085

Figura D.2: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 1, factor de descuento al 4%

D.1.3. Parte 1: Resultado bajo factor de descuento 8%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 578 139	\$ 11 846 974	\$ 9 464 120	\$ 7 499 002	\$ 6 444 077	\$ 50 832 311
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 548 444	\$ 19 501 235	\$ 14 473 802	\$ 9 939 705	\$ 6 387 539	\$ 65 850 724
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 548 444	\$ 12 322 121	\$ 10 342 757	\$ 8 344 723	\$ 6 396 492	\$ 52 954 536
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 548 444	\$ 9 504 562	\$ 7 866 749	\$ 6 595 591	\$ 6 464 929	\$ 45 980 275
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 10 662 451	\$ 9 098 276	\$ 7 422 531	\$ 6 084 524	\$ 4 662 141	\$ 37 929 924
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 649 500	\$ 7 871 377	\$ 7 235 171	\$ 6 579 210	\$ 5 708 613	\$ 39 043 871
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 649 500	\$ 9 994 853	\$ 8 208 176	\$ 6 895 533	\$ 5 912 137	\$ 42 660 200
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 649 500	\$ 10 170 346	\$ 8 530 216	\$ 7 267 727	\$ 5 918 486	\$ 43 536 274
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 26 240 590	\$ 20 945 250	\$ 16 886 651	\$ 13 583 526	\$ 11 106 218	\$ 88 762 235
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 27 197 944	\$ 27 372 612	\$ 21 708 973	\$ 16 518 914	\$ 12 096 152	\$ 104 894 595
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 27 197 944	\$ 22 316 974	\$ 18 550 933	\$ 15 240 256	\$ 12 308 629	\$ 95 614 736
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 27 197 944	\$ 19 674 908	\$ 16 396 965	\$ 13 863 318	\$ 12 383 415	\$ 89 516 549
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 553 341	\$ 8 787 696	\$ 7 058 482	\$ 5 560 057	\$ 4 669 477	\$ 37 629 052
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 980 063	\$ 11 841 451	\$ 9 416 293	\$ 7 287 051	\$ 5 410 822	\$ 45 935 680
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 980 063	\$ 9 702 863	\$ 8 321 466	\$ 6 916 924	\$ 5 594 535	\$ 42 515 852
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 980 063	\$ 9 476 151	\$ 7 923 297	\$ 6 474 572	\$ 5 657 163	\$ 41 511 246
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 14 687 250	\$ 12 157 555	\$ 9 828 169	\$ 8 023 469	\$ 6 436 741	\$ 51 133 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 217 880	\$ 15 531 161	\$ 12 292 680	\$ 9 231 864	\$ 6 685 330	\$ 58 958 915
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 217 880	\$ 12 614 111	\$ 10 229 467	\$ 8 323 332	\$ 6 714 094	\$ 53 098 884
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 217 880	\$ 10 198 757	\$ 8 473 668	\$ 7 388 746	\$ 6 726 252	\$ 48 005 303

Figura D.3: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 1, factor de descuento al 8%

D.2. Resultados para Instancia 2

D.2.1. Parte 1: Resultados bajo factor de descuento 1 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 252 166	\$ 13 003 314	\$ 11 129 977	\$ 9 287 192	\$ 8 471 067	\$ 57 143 717
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 14 572 823	\$ 14 374 560	\$ 17 967 716	\$ 14 571 267	\$ 12 652 256	\$ 74 138 623
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 14 572 823	\$ 13 140 385	\$ 12 749 789	\$ 10 594 481	\$ 9 356 612	\$ 60 414 091
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 14 572 823	\$ 11 906 704	\$ 9 216 568	\$ 7 617 367	\$ 6 593 311	\$ 49 906 773
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 9 995 758	\$ 9 403 893	\$ 8 193 066	\$ 7 279 348	\$ 6 007 663	\$ 40 879 727
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 423 322	\$ 11 304 195	\$ 7 265 507	\$ 6 964 939	\$ 6 005 742	\$ 42 963 706
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 423 322	\$ 11 305 578	\$ 8 960 044	\$ 7 975 958	\$ 6 725 501	\$ 46 390 404
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 423 322	\$ 11 306 961	\$ 9 801 463	\$ 8 545 393	\$ 7 310 677	\$ 48 387 817
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 25 247 924	\$ 22 407 207	\$ 19 323 043	\$ 16 566 540	\$ 14 478 730	\$ 98 023 444
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 25 996 145	\$ 25 678 755	\$ 25 233 224	\$ 21 536 206	\$ 18 657 998	\$ 117 102 328
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 25 996 145	\$ 24 445 964	\$ 21 709 834	\$ 18 570 439	\$ 16 082 113	\$ 106 804 495
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 25 996 145	\$ 23 213 666	\$ 19 018 030	\$ 16 162 760	\$ 13 903 989	\$ 98 294 590
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 287 589	\$ 9 615 706	\$ 8 335 751	\$ 6 893 803	\$ 6 175 316	\$ 42 308 165
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 10 801 575	\$ 9 740 329	\$ 10 452 636	\$ 8 371 193	\$ 7 140 237	\$ 46 505 969
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 10 801 575	\$ 9 738 416	\$ 9 050 709	\$ 7 498 940	\$ 6 527 586	\$ 43 617 225
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 10 801 575	\$ 9 736 505	\$ 8 320 915	\$ 6 992 902	\$ 6 057 158	\$ 41 909 054
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 13 960 335	\$ 12 791 501	\$ 10 987 292	\$ 9 672 737	\$ 8 303 414	\$ 55 715 279
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 194 570	\$ 15 938 426	\$ 14 780 588	\$ 13 165 013	\$ 11 517 762	\$ 70 596 359
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 194 570	\$ 14 707 547	\$ 12 659 125	\$ 11 071 500	\$ 9 554 527	\$ 63 187 270
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 194 570	\$ 13 477 161	\$ 10 697 116	\$ 9 169 858	\$ 7 846 831	\$ 56 385 536

Figura D.4: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 2, factor de descuento al 1 %

D.2.2. Parte 2: Resultados bajo factor de descuento 4%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 746 752	\$ 12 416 228	\$ 10 301 737	\$ 8 446 113	\$ 7 572 273	\$ 54 483 102
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 710 989	\$ 13 547 442	\$ 16 636 631	\$ 13 285 883	\$ 11 142 952	\$ 70 323 896
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 710 989	\$ 12 385 181	\$ 11 785 408	\$ 9 515 937	\$ 8 127 570	\$ 57 525 086
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 710 989	\$ 11 223 385	\$ 8 509 282	\$ 6 703 621	\$ 5 723 604	\$ 47 870 880
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 10 320 000	\$ 9 166 747	\$ 7 762 686	\$ 6 633 027	\$ 5 236 623	\$ 39 119 081
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 624 152	\$ 10 289 974	\$ 6 363 959	\$ 5 938 189	\$ 5 042 232	\$ 39 258 505
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 624 152	\$ 10 277 131	\$ 7 888 496	\$ 6 883 306	\$ 5 682 203	\$ 42 355 288
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 624 152	\$ 10 264 294	\$ 8 632 492	\$ 7 452 498	\$ 6 140 515	\$ 44 113 951
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 26 066 751	\$ 21 582 975	\$ 18 064 422	\$ 15 079 140	\$ 12 808 896	\$ 93 602 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 27 335 140	\$ 23 837 416	\$ 23 000 589	\$ 19 224 071	\$ 16 185 184	\$ 109 582 401
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 27 335 140	\$ 22 662 313	\$ 19 673 904	\$ 16 399 243	\$ 13 809 773	\$ 99 880 374
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 27 335 140	\$ 21 487 679	\$ 17 141 774	\$ 14 156 119	\$ 11 864 119	\$ 91 984 831
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 855 209	\$ 9 363 384	\$ 7 813 846	\$ 6 376 642	\$ 5 558 235	\$ 40 967 317
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 658 008	\$ 9 204 057	\$ 9 647 039	\$ 7 608 141	\$ 6 277 754	\$ 44 394 999
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 658 008	\$ 9 205 852	\$ 8 324 857	\$ 6 720 770	\$ 5 669 083	\$ 41 578 571
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 658 008	\$ 9 207 646	\$ 7 641 878	\$ 6 185 144	\$ 5 239 817	\$ 39 932 491
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 14 211 542	\$ 12 219 591	\$ 10 250 576	\$ 8 702 497	\$ 7 250 661	\$ 52 634 867
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 677 133	\$ 14 633 359	\$ 13 353 550	\$ 11 615 930	\$ 9 907 430	\$ 65 187 402
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 677 133	\$ 13 456 461	\$ 11 349 047	\$ 9 678 473	\$ 8 140 690	\$ 58 301 803
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 677 133	\$ 12 280 033	\$ 9 499 896	\$ 7 970 975	\$ 6 624 302	\$ 52 052 340

Figura D.5: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 2, factor de descuento al 4%

D.2.3. Parte 1: Resultado bajo factor de descuento 8%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 578 139	\$ 11 846 974	\$ 9 464 120	\$ 7 499 002	\$ 6 444 077	\$ 50 832 311
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 549 907	\$ 12 920 084	\$ 15 252 848	\$ 11 668 508	\$ 9 544 026	\$ 64 935 373
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 549 907	\$ 11 819 298	\$ 10 854 909	\$ 8 388 426	\$ 7 013 808	\$ 53 626 348
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 549 907	\$ 10 718 951	\$ 7 860 260	\$ 5 886 435	\$ 4 944 117	\$ 44 959 671
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 10 662 451	\$ 9 098 276	\$ 7 422 531	\$ 6 084 524	\$ 4 662 141	\$ 37 929 924
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 206 849	\$ 9 588 656	\$ 5 669 528	\$ 5 122 294	\$ 4 172 343	\$ 35 759 669
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 206 849	\$ 9 559 979	\$ 7 044 789	\$ 5 973 257	\$ 4 690 164	\$ 38 475 037
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 206 849	\$ 9 531 313	\$ 7 700 172	\$ 6 490 292	\$ 5 075 805	\$ 40 004 431
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 26 240 590	\$ 20 945 250	\$ 16 886 651	\$ 13 583 526	\$ 11 106 218	\$ 88 762 235
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 26 756 756	\$ 22 508 740	\$ 20 922 375	\$ 16 790 802	\$ 13 716 369	\$ 100 695 042
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 26 756 756	\$ 21 379 276	\$ 17 899 697	\$ 14 361 683	\$ 11 703 972	\$ 92 101 385
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 26 756 756	\$ 20 250 264	\$ 15 560 432	\$ 12 376 727	\$ 10 019 922	\$ 84 964 102
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 553 341	\$ 8 787 696	\$ 7 058 482	\$ 5 560 057	\$ 4 669 477	\$ 37 629 052
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 537 434	\$ 8 772 981	\$ 8 844 136	\$ 6 683 465	\$ 5 352 507	\$ 41 190 523
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 537 434	\$ 8 781 318	\$ 7 660 045	\$ 5 930 918	\$ 4 872 103	\$ 38 781 818
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 537 434	\$ 8 789 652	\$ 7 044 899	\$ 5 446 105	\$ 4 505 038	\$ 37 323 129
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 14 687 250	\$ 12 157 555	\$ 9 828 169	\$ 8 023 469	\$ 6 436 741	\$ 51 133 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 219 322	\$ 13 735 759	\$ 12 078 240	\$ 10 107 337	\$ 8 363 862	\$ 59 504 520
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 219 322	\$ 12 597 958	\$ 10 239 653	\$ 8 430 765	\$ 6 831 869	\$ 53 319 567
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 219 322	\$ 11 460 612	\$ 8 515 533	\$ 6 930 623	\$ 5 514 884	\$ 47 640 973

Figura D.6: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 2, factor de descuento al 8%

D.3. Resultados para Instancia 3

D.3.1. Parte 1: Resultados bajo factor de descuento 1%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 252 166	\$ 13 003 314	\$ 11 129 977	\$ 9 287 192	\$ 8 471 067	\$ 57 143 717
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 14 916 327	\$ 16 077 235	\$ 17 481 465	\$ 14 641 033	\$ 12 810 570	\$ 75 926 630
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 14 916 327	\$ 13 071 109	\$ 12 604 498	\$ 10 991 080	\$ 9 816 120	\$ 61 399 134
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 14 916 327	\$ 10 773 413	\$ 8 929 449	\$ 8 176 066	\$ 7 263 119	\$ 50 058 374
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 9 995 758	\$ 9 403 893	\$ 8 193 066	\$ 7 279 348	\$ 6 007 663	\$ 40 879 727
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 693 703	\$ 10 676 928	\$ 7 338 409	\$ 6 600 215	\$ 5 645 372	\$ 41 954 627
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 693 703	\$ 10 892 886	\$ 8 840 377	\$ 7 853 830	\$ 6 572 353	\$ 45 853 149
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 693 703	\$ 10 872 360	\$ 9 454 226	\$ 8 830 534	\$ 7 476 994	\$ 48 327 817
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 25 247 924	\$ 22 407 207	\$ 19 323 043	\$ 16 566 540	\$ 14 478 730	\$ 98 023 444
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 26 610 030	\$ 26 754 163	\$ 24 819 874	\$ 21 241 249	\$ 18 455 941	\$ 117 881 257
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 26 610 030	\$ 23 963 995	\$ 21 444 875	\$ 18 844 910	\$ 16 388 472	\$ 107 252 283
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 26 610 030	\$ 21 645 773	\$ 18 383 676	\$ 17 006 600	\$ 14 740 113	\$ 98 386 191
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 287 589	\$ 9 615 706	\$ 8 335 751	\$ 6 893 803	\$ 6 175 316	\$ 42 308 165
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 058 102	\$ 10 126 190	\$ 10 261 557	\$ 8 534 716	\$ 7 374 126	\$ 47 354 691
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 058 102	\$ 9 597 343	\$ 8 924 927	\$ 7 714 438	\$ 6 780 031	\$ 44 074 840
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 058 102	\$ 9 328 089	\$ 7 986 900	\$ 7 272 934	\$ 6 369 561	\$ 42 015 587
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 13 960 335	\$ 12 791 501	\$ 10 987 292	\$ 9 672 737	\$ 8 303 414	\$ 55 715 279
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 551 928	\$ 16 627 973	\$ 14 558 318	\$ 12 706 532	\$ 11 081 815	\$ 70 526 566
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 551 928	\$ 14 366 652	\$ 12 519 948	\$ 11 130 472	\$ 9 608 442	\$ 63 177 443
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 551 928	\$ 12 317 684	\$ 10 396 775	\$ 9 733 666	\$ 8 370 551	\$ 56 370 604

Figura D.7: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 3, factor de descuento al 1%

D.3.2. Parte 2: Resultados bajo factor de descuento 4%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 746 752	\$ 12 416 228	\$ 10 301 737	\$ 8 446 113	\$ 7 572 273	\$ 54 483 102
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 711 288	\$ 15 579 652	\$ 16 320 037	\$ 13 301 948	\$ 11 341 082	\$ 72 254 008
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 711 288	\$ 12 708 471	\$ 11 787 424	\$ 9 804 531	\$ 8 489 283	\$ 58 500 997
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 711 288	\$ 10 610 149	\$ 8 591 647	\$ 6 956 461	\$ 6 075 656	\$ 47 945 202
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 10 320 000	\$ 9 166 747	\$ 7 762 686	\$ 6 633 027	\$ 5 236 623	\$ 39 119 081
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 624 374	\$ 9 649 452	\$ 6 479 166	\$ 5 737 598	\$ 4 764 582	\$ 38 255 172
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 624 374	\$ 10 105 897	\$ 7 888 930	\$ 6 711 464	\$ 5 489 530	\$ 41 820 195
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 624 374	\$ 10 252 331	\$ 8 634 130	\$ 7 412 961	\$ 6 062 589	\$ 43 986 385
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 26 066 751	\$ 21 582 975	\$ 18 064 422	\$ 15 079 140	\$ 12 808 896	\$ 93 602 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 27 335 662	\$ 25 229 105	\$ 22 799 203	\$ 19 039 547	\$ 16 105 664	\$ 110 509 180
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 27 335 662	\$ 22 814 368	\$ 19 676 353	\$ 16 515 995	\$ 13 978 813	\$ 100 321 191
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 27 335 662	\$ 20 862 480	\$ 17 225 778	\$ 14 369 422	\$ 12 138 245	\$ 91 931 586
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 855 209	\$ 9 363 384	\$ 7 813 846	\$ 6 376 642	\$ 5 558 235	\$ 40 967 317
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 658 232	\$ 9 782 340	\$ 9 551 260	\$ 7 761 012	\$ 6 521 869	\$ 45 274 713
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 658 232	\$ 9 347 292	\$ 8 325 062	\$ 6 860 878	\$ 5 847 040	\$ 42 038 504
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 658 232	\$ 9 207 830	\$ 7 643 673	\$ 6 216 499	\$ 5 313 367	\$ 40 039 602
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 14 211 542	\$ 12 219 591	\$ 10 250 576	\$ 8 702 497	\$ 7 250 661	\$ 52 634 867
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 677 430	\$ 15 446 765	\$ 13 247 943	\$ 11 278 534	\$ 9 583 795	\$ 65 234 467
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 677 430	\$ 13 467 076	\$ 11 351 291	\$ 9 655 118	\$ 8 131 773	\$ 58 282 687
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 677 430	\$ 11 654 650	\$ 9 582 105	\$ 8 152 923	\$ 6 824 877	\$ 51 891 985

Figura D.8: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 3, factor de descuento al 4%

D.3.3. Parte 1: Resultado bajo factor de descuento 8%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Valor Esperado
Ingresos por ventas de productos Pulpables						
Instancia Determinista	\$ 15 578 139	\$ 11 846 974	\$ 9 464 120	\$ 7 499 002	\$ 6 444 077	\$ 50 832 311
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 541 519	\$ 14 046 991	\$ 15 338 803	\$ 11 795 857	\$ 9 547 982	\$ 66 271 153
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 541 519	\$ 12 159 271	\$ 11 197 206	\$ 8 725 609	\$ 7 196 237	\$ 54 819 842
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 541 519	\$ 10 412 315	\$ 8 244 257	\$ 6 114 055	\$ 5 161 142	\$ 45 473 288
Otros Ingresos por ventas						
Instancia Determinista	\$ 10 662 451	\$ 9 098 276	\$ 7 422 531	\$ 6 084 524	\$ 4 662 141	\$ 37 929 924
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 191 243	\$ 9 402 665	\$ 5 563 777	\$ 4 891 451	\$ 3 973 628	\$ 35 022 764
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 191 243	\$ 9 330 181	\$ 6 797 808	\$ 5 757 248	\$ 4 577 283	\$ 37 653 762
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 191 243	\$ 9 279 438	\$ 7 445 561	\$ 6 445 011	\$ 5 071 803	\$ 39 433 056
Ingresos Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 26 240 590	\$ 20 945 250	\$ 16 886 651	\$ 13 583 526	\$ 11 106 218	\$ 88 762 235
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 26 732 762	\$ 23 449 656	\$ 20 902 580	\$ 16 687 308	\$ 13 521 611	\$ 101 293 917
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 26 732 762	\$ 21 489 452	\$ 17 995 014	\$ 14 482 857	\$ 11 773 520	\$ 92 473 604
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 26 732 762	\$ 19 691 753	\$ 15 689 818	\$ 12 559 065	\$ 10 232 945	\$ 84 906 344
Costes Totales en Periodo de Negocio						
Instancia Determinista	\$ 11 553 341	\$ 8 787 696	\$ 7 058 482	\$ 5 560 057	\$ 4 669 477	\$ 37 629 052
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 11 519 008	\$ 8 944 500	\$ 8 996 040	\$ 6 869 176	\$ 5 456 734	\$ 41 785 458
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 11 519 008	\$ 8 949 064	\$ 7 878 817	\$ 6 102 721	\$ 4 929 706	\$ 39 379 316
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 11 519 008	\$ 8 958 239	\$ 7 265 211	\$ 5 482 140	\$ 4 490 614	\$ 37 715 212
Utilidad Esperada en Periodo de Negocios						
Instancia Determinista	\$ 14 687 250	\$ 12 157 555	\$ 9 828 169	\$ 8 023 469	\$ 6 436 741	\$ 51 133 183
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	\$ 15 213 753	\$ 14 505 156	\$ 11 906 540	\$ 9 818 132	\$ 8 064 876	\$ 59 508 458
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	\$ 15 213 753	\$ 12 540 388	\$ 10 116 197	\$ 8 380 136	\$ 6 843 814	\$ 53 094 289
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	\$ 15 213 753	\$ 10 733 515	\$ 8 424 607	\$ 7 076 925	\$ 5 742 332	\$ 47 191 132

Figura D.9: Resumen resultado problema Estocástico. Instancia 3, factor de descuento al 8%

Apéndice E

Resultados detallados de cosecha para
las instancias del problema Estocástico

E.1. Resultados para Instancia 1

E.1.1. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 1 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	111 719(100%)	100 909(100%)	87 747(100%)	76 302(100%)	66 349(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	109 582(100%)	101 568(100%)	88 320(100%)	76 800(100%)	66 783(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	109 582(100%)	97 499(100%)	85 952(100%)	76 035(100%)	74 641(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	109 582(100%)	95 289(100%)	83 114(100%)	73 242(100%)	83 217(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	57 880(51,81%)	62 266(61,70%)	58 559(66,74%)	52 752(69,14%)	41 960(63,24%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	82 186(75,00%)	55 608(54,75%)	54 962(62,23%)	52 234(68,01%)	52 881(79,18%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	82 186(75,00%)	75 826(77,77%)	65 303(75,98%)	55 704(73,26%)	59 577(79,82%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	82 186(75,00%)	76 751(80,55%)	67 624(81,36%)	58 976(80,52%)	66 884(80,37%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	51 753(46,32%)	38 424(38,08%)	24 522(27,95%)	21 831(28,61%)	37 192(56,06%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	25 204(23,00%)	42 373(41,72%)	30 794(34,87%)	22 717(29,58%)	12 843(19,23%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	25 204(23,00%)	20 039(20,55%)	19 101(22,22%)	18 831(24,77%)	13 928(18,66%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	25 204(23,00%)	17 156(18,00%)	14 354(17,27%)	13 240(18,08%)	15 112(18,16%)

Figura E.1: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 1, factor de descuento al 1 %

E.1.2. Parte 2: Uso de madera bajo factor de descuento 4 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	118 768(100%)	103 324(100%)	89 854(100%)	78 149(100%)	67 928(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	118 702(100%)	103 579(100%)	90 069(100%)	78 321(100%)	68 105(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	118 702(100%)	103 283(100%)	89 849(100%)	78 139(100%)	67 947(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	118 702(100%)	103 219(100%)	89 762(100%)	78 059(100%)	67 878(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	89 076(75,00%)	82 742(80,08%)	72 759(80,97%)	64 901(83,05%)	53 386(78,59%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	89 027(75,00%)	56 634(54,68%)	55 965(62,14%)	53 078(67,77%)	53 504(78,56%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	89 027(75,00%)	80 116(77,57%)	68 170(75,87%)	57 766(73,93%)	53 432(78,64%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	89 027(75,00%)	82 699(80,12%)	72 611(80,89%)	63 670(81,57%)	53 383(78,65%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	27 317(23,00%)	18 993(18,38%)	15 786(17,57%)	12 256(15,68%)	13 405(19,73%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	27 301(23,00%)	43 278(41,78%)	31 479(34,95%)	23 346(29,81%)	13 479(19,79%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	27 301(23,00%)	21 413(20,73%)	20 048(22,31%)	18 878(24,16%)	13 400(19,72%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	27 301(23,00%)	18 980(18,39%)	15 882(17,69%)	13 372(17,13%)	13 383(19,72%)

Figura E.2: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 1, factor de descuento al 4 %

E.1.3. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 8 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	121 990(100%)	106 078(100%)	92 242(100%)	80 210(100%)	69 748(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	121 783(100%)	105 910(100%)	92 096(100%)	80 084(100%)	69 647(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	121 783(100%)	105 899(100%)	92 092(100%)	80 129(100%)	69 995(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	121 783(100%)	105 898(100%)	92 097(100%)	80 104(100%)	70 190(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	91 492(75,00%)	84 843(79,98%)	74 586(80,86%)	66 358(82,73%)	54 768(78,52%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	91 337(75,00%)	57 823(54,60%)	56 913(61,80%)	55 766(69,63%)	55 008(78,98%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	91 337(75,00%)	82 022(77,45%)	69 498(75,47%)	60 554(75,57%)	55 476(79,26%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	91 337(75,00%)	84 708(79,99%)	74 089(80,45%)	66 151(82,58%)	55 219(78,67%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	28 058(23,00%)	19 637(18,51%)	16 346(17,72%)	12 862(16,04%)	13 829(19,83%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	28 010(23,00%)	44 327(41,85%)	32 462(35,25%)	22 468(28,06%)	13 521(19,41%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	28 010(23,00%)	22 066(20,84%)	20 883(22,68%)	18 127(22,62%)	13 414(19,16%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	28 010(23,00%)	19 596(18,50%)	16 665(18,10%)	12 985(16,21%)	13 822(19,69%)

Figura E.3: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 1, factor de descuento al 8 %

E.2. Resultados para Instancia 2

E.2.1. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 1 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	111 719(100%)	100 909(100%)	87 747(100%)	76 302(100%)	66 349(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	106 743(100%)	102 419(100%)	89 090(100%)	77 484(100%)	67 569(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	106 743(100%)	102 353(100%)	89 059(100%)	77 459(100%)	67 421(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	106 743(100%)	102 287(100%)	88 945(100%)	77 344(100%)	67 255(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	57 880(51,81%)	62 266(61,70%)	58 559(66,74%)	52 752(69,14%)	41 960(63,24%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	80 057(75,00%)	81 460(79,54%)	49 331(55,37%)	50 330(64,96%)	44 609(66,02%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	80 057(75,00%)	81 410(79,54%)	64 555(72,49%)	59 245(76,48%)	50 841(75,41%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	80 057(75,00%)	81 361(79,54%)	72 114(81,08%)	64 257(83,08%)	55 908(83,13%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	51 753(46,32%)	38 424(38,08%)	24 522(27,95%)	21 831(28,61%)	37 192(56,06%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	24 551(23,00%)	19 371(18,91%)	36 682(41,17%)	25 115(32,41%)	21 170(31,33%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	24 551(23,00%)	19 356(18,91%)	22 647(25,43%)	16 882(21,79%)	15 321(22,72%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	24 551(23,00%)	19 341(18,91%)	15 588(17,53%)	12 159(15,72%)	10 546(15,68%)

Figura E.4: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 2, factor de descuento al 1 %

E.2.2. Parte 2: Uso de madera bajo factor de descuento 4 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	118 768(100%)	103 324(100%)	89 854(100%)	78 149(100%)	67 928(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	118 498(100%)	103 158(100%)	90 016(100%)	78 543(100%)	68 490(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	118 498(100%)	103 100(100%)	89 791(100%)	78 151(100%)	68 039(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	118 498(100%)	103 042(100%)	89 602(100%)	77 915(100%)	67 753(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	89 076(75,00%)	82 742(80,08%)	72 759(80,97%)	64 901(83,05%)	53 386(78,59%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	88 874(75,00%)	82 653(80,12%)	49 803(55,33%)	50 027(63,69%)	44 833(65,46%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	88 874(75,00%)	82 609(80,13%)	65 029(72,42%)	59 788(76,50%)	51 619(75,87%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	88 874(75,00%)	82 566(80,13%)	72 606(81,03%)	65 719(84,35%)	56 554(83,47%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	27 317(23,00%)	18 993(18,38%)	15 786(17,57%)	12 256(15,68%)	13 405(19,73%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	27 255(23,00%)	18 966(18,38%)	37 099(41,21%)	26 335(33,53%)	21 800(31,83%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	27 255(23,00%)	18 952(18,38%)	22 884(25,49%)	17 016(21,77%)	15 180(22,31%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	27 255(23,00%)	18 939(18,38%)	15 739(17,57%)	11 359(14,58%)	10 415(15,37%)

Figura E.5: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 2, factor de descuento al 4 %

E.2.3. Parte 3: Uso de madera bajo factor de descuento 8 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	121 990(100%)	106 078(100%)	92 242(100%)	80 210(100%)	69 748(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	121 794(100%)	105 908(100%)	92 094(100%)	80 082(100%)	70 083(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	121 794(100%)	105 917(100%)	92 194(100%)	80 179(100%)	69 866(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	121 794(100%)	105 926(100%)	92 110(100%)	80 095(100%)	69 648(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	91 492(75,00%)	84 843(79,98%)	74 586(80,86%)	66 358(82,73%)	54 768(78,52%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	91 346(75,00%)	84 716(79,99%)	50 667(55,02%)	50 831(63,47%)	45 123(64,39%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	91 346(75,00%)	84 722(79,99%)	66 417(72,04%)	61 363(76,53%)	52 082(74,55%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	91 346(75,00%)	84 729(79,99%)	74 215(80,57%)	67 928(84,81%)	57 399(82,41%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	28 058(23,00%)	19 637(18,51%)	16 346(17,72%)	12 862(16,04%)	13 829(19,83%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	28 013(23,00%)	19 598(18,50%)	38 205(41,49%)	27 007(33,72%)	22 977(32,79%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	28 013(23,00%)	19 600(18,51%)	23 812(25,83%)	17 435(21,74%)	16 416(23,50%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	28 013(23,00%)	19 602(18,51%)	16 561(17,98%)	11 344(14,16%)	11 370(16,32%)

Figura E.6: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 2, factor de descuento al 8 %

E.3. Resultados para Instancia 3

E.3.1. Parte 1: Uso de madera bajo factor de descuento 1 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	111 719(100%)	100 909(100%)	87 747(100%)	76 302(100%)	66 349(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	109 259(100%)	101 661(100%)	88 401(100%)	76 871(100%)	67 093(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	109 259(100%)	99 800(100%)	87 877(100%)	78 145(100%)	68 023(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	109 259(100%)	98 177(100%)	85 587(100%)	80 217(100%)	69 754(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	57 880(51,81%)	62 266(61,70%)	58 559(66,74%)	52 752(69,14%)	41 960(63,24%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	81 945(75,00%)	75 822(74,58%)	50 107(56,68%)	46 850(60,95%)	40 864(60,91%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	81 945(75,00%)	78 242(78,40%)	63 702(72,49%)	57 914(74,11%)	49 122(72,21%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	81 945(75,00%)	78 296(79,75%)	69 595(81,31%)	66 378(82,75%)	57 037(81,77%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	51 753(46,32%)	38 424(38,08%)	24 522(27,95%)	21 831(28,61%)	37 192(56,06%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	25 130(23,00%)	23 874(23,48%)	35 335(39,97%)	27 717(36,06%)	24 174(36,03%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	25 130(23,00%)	19 926(19,97%)	22 345(25,43%)	18 732(23,97%)	17 457(25,66%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	25 130(23,00%)	18 380(18,72%)	14 816(17,31%)	12 858(16,03%)	11 809(16,93%)

Figura E.7: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 3, factor de descuento al 1 %

E.3.2. Parte 2: Uso de madera bajo factor de descuento 4%

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	118 768(100%)	103 324(100%)	89 854(100%)	78 149(100%)	67 928(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	118 501(100%)	103 344(100%)	90 017(100%)	78 484(100%)	68 462(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	118 501(100%)	103 144(100%)	89 799(100%)	78 154(100%)	68 069(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	118 501(100%)	103 044(100%)	89 605(100%)	77 918(100%)	67 771(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	89 076(75,00%)	82 742(80,08%)	72 759(80,97%)	64 901(83,05%)	53 386(78,59%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	88 875(75,00%)	76 189(73,72%)	50 948(56,60%)	47 788(60,89%)	41 368(60,42%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	88 875(75,00%)	80 992(78,52%)	65 033(72,42%)	57 967(74,17%)	49 353(72,51%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	88 875(75,00%)	82 567(80,13%)	72 609(81,03%)	65 328(83,84%)	55 698(82,19%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	27 317(23,00%)	18 993(18,38%)	15 786(17,57%)	12 256(15,68%)	13 405(19,73%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	27 255(23,00%)	25 101(24,29%)	36 047(40,04%)	28 339(36,11%)	24 958(36,45%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	27 255(23,00%)	20 485(19,86%)	22 888(25,49%)	18 693(23,92%)	17 291(25,40%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	27 255(23,00%)	18 939(18,38%)	15 740(17,57%)	11 722(15,04%)	11 219(16,55%)

Figura E.8: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 3, factor de descuento al 4%

E.3.3. Parte 3: Uso de madera bajo factor de descuento 8 %

	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5
Cosecha total					
Instancia Determinista	121 990(100%)	106 078(100%)	92 242(100%)	80 210(100%)	69 748(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	121 729(100%)	105 963(100%)	92 147(100%)	80 128(100%)	69 676(100%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	121 729(100%)	105 895(100%)	92 104(100%)	80 104(100%)	69 659(100%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	121 729(100%)	105 851(100%)	92 048(100%)	80 042(100%)	69 603(100%)
Madera destinada a productos aserrables					
Instancia Determinista	91 492(75,00%)	84 843(79,98%)	74 586(80,86%)	66 358(82,73%)	54 768(78,52%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	91 296(75,00%)	82 538(77,89%)	49 903(54,16%)	48 075(60,00%)	42 157(60,50%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	91 296(75,00%)	82 487(77,90%)	63 929(69,41%)	58 760(73,36%)	50 437(72,41%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	91 296(75,00%)	82 454(77,90%)	71 503(77,68%)	67 387(84,19%)	57 248(82,25%)
Madera destinada a productos Pulpables					
Instancia Determinista	28 058(23,00%)	19 637(18,51%)	16 346(17,72%)	12 862(16,04%)	13 829(19,83%)
Promedio Ponderado Escenarios Superiores	27 998(23,00%)	21 609(20,39%)	38 873(42,19%)	29 561(36,89%)	25 351(36,38%)
Promedio Ponderado Instancia Estocástica	27 998(23,00%)	21 594(20,39%)	25 954(28,18%)	19 741(24,64%)	17 757(25,49%)
Promedio Ponderado Escenarios Inferiores	27 998(23,00%)	21 583(20,39%)	18 949(20,59%)	11 790(14,73%)	11 482(16,50%)

Figura E.9: Cantidad de madera destinada a cada categoría de producto relevante para el caso determinista, comparado con los escenarios con las mejores 10 trayectorias de precio, la cosecha promedio (en valor esperado) de la instancia y las peores 10 trayectorias de precio. Instancia 3, factor de descuento al 8 %

Apéndice F

Resumen de volumen cosechado

F.1. Cosecha en Instancia 1, Factor de descuento de 1 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.69	483 251 m ²	23 012 m ²	30.12
C2	10 a 14 años	7.78	464 634 m ²	23 232 m ²	30.88
C3	15 a 19 años	6.67	455 897 m ²	22 795 m ²	30.34
C4	20 a 24 años	5.64	433 766 m ²	21 688 m ²	31.20
C5	Sobre 24 años	3.32	313 453 m ²	19 591 m ²	30.23

Tabla F.1: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 1 % en Instancia 1

F.2. Cosecha en Instancia 1, Factor de descuento de 4 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.69	486 074 m ²	23 146 m ²	30.07
C2	10 a 14 años	7.73	464 898 m ²	23 245 m ²	30.63
C3	15 a 19 años	6.69	461 285 m ²	23 064 m ²	30.44
C4	20 a 24 años	5.35	444 053 m ²	22 203 m ²	30.66
C5	Sobre 24 años	3.19	316 284 m ²	19 768 m ²	30.06

Tabla F.2: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 4 % en Instancia 1

F.3. Cosecha en Instancia 1, Factor de descuento de 8 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.49	475 166 m ²	22 627 m ²	20.36
C2	10 a 14 años	7.92	462 362 m ²	23 118 m ²	24.30
C3	15 a 19 años	6.64	459 268 m ²	22 963 m ²	26.09
C4	20 a 24 años	5.32	468 390 m ²	23 420 m ²	28.52
C5	Sobre 24 años	2.96	344 504 m ²	21 532 m ²	29.55

Tabla F.3: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 8 % en Instancia 1

F.4. Cosecha en Instancia 2, Factor de descuento de 1 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.69	483 251 m ²	23 012 m ²	30.12
C2	10 a 14 años	7.78	463 649 m ²	23 182 m ²	30.89
C3	15 a 19 años	6.66	459 510 m ²	22 976 m ²	30.29
C4	20 a 24 años	5.66	429 727 m ²	21 486 m ²	31.34
C5	Sobre 24 años	3.41	290 794 m ²	18 175 m ²	30.30

Tabla F.4: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 1 % en Instancia 2

F.5. Cosecha en Instancia 2, Factor de descuento de 4 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.69	486 327 m ²	23 158 m ²	26.31
C2	10 a 14 años	7.73	463 546 m ²	23 177 m ²	30.63
C3	15 a 19 años	6.70	457 045 m ²	22 852 m ²	30.49
C4	20 a 24 años	5.35	453 741 m ²	22 687 m ²	30.60
C5	Sobre 24 años	3.29	322 529 m ²	20 158 m ²	30.21

Tabla F.5: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 4 % en Instancia 2

F.6. Cosecha en Instancia 2, Factor de descuento de 8 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.50	476 236 m ²	22 678 m ²	29.11
C2	10 a 14 años	7.92	461 679 m ²	23 084 m ²	31.58
C3	15 a 19 años	6.63	459 964 m ²	22 998 m ²	30.13
C4	20 a 24 años	5.34	467 779 m ²	23 389 m ²	30.54
C5	Sobre 24 años	3.07	345 773 m ²	21 611 m ²	29.82

Tabla F.6: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 8 % en Instancia 2

F.7. Cosecha en Instancia 3, Factor de descuento de 1 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.69	483 251 m ²	23 012 m ²	30.12
C2	10 a 14 años	7.78	464 006 m ²	23 200 m ²	30.89
C3	15 a 19 años	6.66	460 526 m ²	23 026 m ²	30.30
C4	20 a 24 años	5.65	432 992 m ²	21 650 m ²	31.30
C5	Sobre 24 años	3.36	299 785 m ²	18 737 m ²	30.26

Tabla F.7: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 1 % en Instancia 3

F.8. Cosecha en Instancia 3, Factor de descuento de 4 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.69	485 845 m ²	23 135 m ²	30.08
C2	10 a 14 años	7.73	461 929 m ²	23 096 m ²	30.65
C3	15 a 19 años	6.70	457 520 m ²	22 876 m ²	30.49
C4	20 a 24 años	5.35	448 978 m ²	22 449 m ²	30.68
C5	Sobre 24 años	3.41	300 095 m ²	18 756 m ²	30.28

Tabla F.8: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 4 % en Instancia 3

F.9. Cosecha en Instancia 3, Factor de descuento de 8 %

Clase	EdadInicial	Periodo de Cosecha (promedio)	Volumen Total	Volumen Promedio (rodal)	Edad Promedio (rodal)
C1	1 a 9 años	8.52	466 202 m ²	22 200 m ²	29.24
C2	10 a 14 años	7.93	464 849 m ²	23 242 m ²	31.63
C3	15 a 19 años	6.66	450 489 m ²	22 524 m ²	30.29
C4	20 a 24 años	5.59	436 531 m ²	21 827 m ²	30.88
C5	Sobre 24 años	2.94	331 166 m ²	20 698 m ²	29.69

Tabla F.9: Cosecha de cada clase de edad, para el factor de descuento 8 % en Instancia 3