



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO AMBIENTE

DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN SOFTWARE DE
AUTOMATIZACIÓN PARA UN MODELO DE ORDENACIÓN
FORESTAL EN BOSQUES COETÁNEOS

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

PABLO ANDRÉS ZÚÑIGA NAVARRETE

Profesor Guía: Sr. Manuel Toral Ibáñez, Ingeniero Forestal
Doctor en Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Profesor Colaborador: Sr. Jorge Gilchrist Moreno, Ingeniero Forestal

Santiago, Chile

2010

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL Y SU MEDIO AMBIENTE

DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN SOFTWARE DE
AUTOMATIZACIÓN PARA UN MODELO DE
ORDENACIÓN FORESTAL EN BOSQUES COETÁNEOS

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

PABLO ANDRÉS ZÚÑIGA NAVARRETE

| Calificaciones: | Nota | Firma |
|---|------|-------|
| Prof. Guía Sr. Manuel Toral Ibáñez | 7,0 | |
| Prof. Consejero Sr. Juan Barrios Martínez | 7,0 | |
| Prof. Consejero Sr. Horacio Bown Intveen | 6,6 | |

DEDICATORIA

Dedico esta investigación y los frutos que de ella se desprendan a toda mi familia y amigos que me han acompañado.

Ensueños lúcidos
sobre morados amaneceres
y transmutadas educaciones
placenteros recreos creativos
lúdicos humanos jugando con barrores fundamentales
fundando la luz en lo oscuro
fertilizando desgracias
transformando las almas en semillas
cuyas raíces se extenderán por miles de sueños

Pedro Zúñiga N.

Poeta chileno

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Pedro y Helia, por otorgarme la posibilidad de estudiar esta hermosa profesión y enseñarme los valores fundamentales de la vida. A mis hermanos, Pedro y Oscar, por acompañarme y aportar con grandes ideas. A mis tíos, Rafael y Claudia, y primos Felipe, Nicol, Marcela y Camila quienes han sido un gran soporte en este camino. A mi abuelita, Lorenza, que con su cariño y comprensión siempre daba una palabra de aliento. A Marylen, a quién correspondo con un amor incondicional, gracias por tu ayuda y comprensión en todos los momentos.

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a todos los docentes e investigadores, que de manera amable y fraterna apoyaron mi estancia en la Universidad de Córdoba (España), y aportaron con sus ideas, correcciones y comentarios en esta investigación, en especial a los señores:

- Ingeniero Forestal Jorge Gilchrist Moreno, docente de excelencia de nuestra facultad y creador del modelo estratégico lineal (MELI), base de esta investigación.
- Dr. Manuel Toral Ibáñez, destacado profesor de nuestra facultad que con su apoyo desinteresado facilitó, en gran medida, este trabajo.
- Dr. Rafael Navarro Cerrillo, investigador y docente de la ETSIAM (Córdoba, España), gran promotor del desarrollo de las ciencias forestales en el mundo.

A mi amigo y maestro Sr. Roberto Garfias Salinas, catedrático destacado de nuestra facultad, cuya amistad, generosidad y ejemplo han contribuido invaluablemente en mi formación profesional y humana. También, a mis amigos Ingenieros Forestales, Jorge Miranda, Natalia Valenzuela, Cristián Núñez, José Salas, Benita Garrido y Suraj Vaswani con quienes he compartido hermosas jornadas de aprendizaje.

A mi amigo Héctor Barría y su familia, gracias por toda su amistad y preocupación.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 2 |
| 2.1. PLANTACIONES FORESTALES EN CHILE | 2 |
| 2.1.1. Antecedentes generales de la industria forestal | 2 |
| 2.1.2. Distribución y superficie de plantaciones en Chile..... | 3 |
| 2.1.3. Consumo y producción de productos forestales..... | 5 |
| 2.1.4. Silvicultura de plantaciones | 6 |
| 2.1.4.1 Plantaciones de pino insigne | 7 |
| 2.1.4.2 Plantaciones de eucalipto | 8 |
| 2.1.5. Certificación de plantaciones | 11 |
| 2.2. ORDENACIÓN FORESTAL | 11 |
| 2.2.1. Conceptos Generales..... | 11 |
| 2.2.2. Planificación Jerarquizada en Ordenación Forestal | 12 |
| 2.2.3. Modelos de Planificación Estratégica Basados en Programación Lineal | 14 |
| 2.2.3.1 Principales Directrices Metodológicas..... | 14 |
| 2.2.3.2 Complementos entre Simulación y Programación Lineal..... | 16 |
| 2.3. TECNOLOGÍA COMPUTACIONAL EN EL SECTOR FORESTAL | 17 |
| 2.3.1. Antecedentes Generales | 17 |
| 2.3.2. El Software en la gestión de bosques..... | 18 |
| 3. HIPÓTESIS | 21 |
| 4. OBJETIVOS | 22 |
| 4.1. OBJETIVO GENERAL | 22 |
| 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS | 23 |
| 5.1. MATERIALES | 23 |
| 5.1.1. Ubicación y descripción del área de estudio | 23 |
| 5.1.1.1 Medio físico | 23 |
| 5.1.1.2 Estado silvícola | 24 |
| 5.1.2. Información primaria y secundaria | 25 |
| 5.1.3. Equipamiento | 25 |
| 5.2. MÉTODOS | 26 |
| 5.2.1. Diseño y construcción del software | 26 |
| 5.2.2. Validación del software en análisis de caso | 28 |
| 6. RESULTADOS..... | 31 |
| 6.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SOFTWARE..... | 31 |
| 6.1.1. Ingeniería y Modelado del Sistema de Información | 31 |
| 6.1.1.1 Visión Global del Sistema..... | 31 |
| 6.1.1.2 Dominio del Sistema..... | 32 |
| 6.1.1.3 Elementos del Sistema | 34 |
| 6.1.2. Análisis de requisitos del software..... | 36 |
| 6.1.2.1 Interfaz del usuario..... | 36 |
| 6.1.2.2 Datos de entrada..... | 37 |
| 6.1.2.3 Información de salida..... | 39 |
| 6.1.2.4 Procesos de transformación..... | 40 |
| 6.1.2.5 Almacenamiento de datos | 42 |
| 6.1.2.6 Rendimientos | 42 |
| 6.1.2.7 Restricciones de desarrollo | 42 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.1.3. | Diseño del Software | 42 |
| 6.1.3.1 | Estructura de Datos | 42 |
| 6.1.3.2 | Arquitectura del Software | 52 |
| 6.1.3.3 | Interfaz gráfica del usuario..... | 54 |
| 6.1.3.4 | Detalle procedimental | 61 |
| 6.1.4. | Generación de código..... | 66 |
| 6.1.5. | Pruebas del software | 67 |
| 6.2. | VALIDACIÓN DEL SOFTWARE..... | 68 |
| 6.2.1. | Definición del problema de ingeniería..... | 68 |
| 6.2.2. | Elementos de la ordenación forestal | 68 |
| 6.2.2.1 | Clasificación de la superficie del patrimonio a ordenar..... | 68 |
| 6.2.2.2 | Silvicultura aplicada a plantaciones de eucalipto..... | 71 |
| 6.2.2.3 | Estimación de los rendimientos volumétricos y financieros..... | 72 |
| 6.2.3. | Planes de ordenación alternativos | 73 |
| 6.2.3.1 | Parámetros económicos..... | 73 |
| 6.2.3.2 | Parámetros de planificación | 74 |
| 6.2.3.3 | Criterios de selección del mejor plan | 75 |
| 6.2.4. | Solución del problema..... | 75 |
| 6.2.4.1 | Comparación de planes ordenación alternativos..... | 75 |
| 6.2.4.2 | Selección del plan de ordenación óptimo..... | 79 |
| 6.2.4.3 | Efectos del plan de ordenación óptimo sobre el patrimonio | 80 |
| 7. | DISCUSIÓN..... | 88 |
| 7.1. | SISTEMAS COMPUTACIONALES EN LA PLANIFICACIÓN FORESTAL | 88 |
| 7.2. | ORDENACIÓN FORESTAL EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO..... | 89 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 7.2.1. | Plantaciones de eucalipto en la Reserva Lago Peñuelas | 89 |
| 7.2.2. | Rotación óptima de plantaciones de eucalipto | 91 |
| 7.3. | LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA | 92 |
| 8. | CONCLUSIONES | 95 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA | 98 |
| 10. | ANEXOS | 104 |
| 11. | APÉNDICES | 106 |

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito crear un nexo entre las tecnologías de información actuales y las técnicas de planificación forestal para la ordenación sustentable de bosques. Es imperante y creciente la necesidad, de los entes planificadores y gestores del bosque, de disponer con programas informáticos que apoyen la toma de decisiones, y a la vez permitan agilizar y facilitar el proceso de resolución de estos problemas de ingeniería, de manera más precisa y oportuna.

El objetivo general consiste en: “Diseñar y aplicar un software de automatización para un modelo de Ordenación forestal de bosques coetáneos en Chile”. El software fue diseñado y construido para formular, resolver y evaluar automáticamente el Modelo Estratégico Lineal o MELI (Gilchrist, 2006), basado en optimización lineal, el cual es capaz de modelar el bosque incluyendo cosechas, raleos, reforestación, distintas calidades de sitio forestal, estructura de la masa forestal, aplicaciones de tratamientos silvícolas, ciclos de corta y diferentes rotaciones. Además, es posible regular el patrimonio forestal por flujos de volumen, flujos financieros u otro objetivo o combinaciones de estos, según sea el criterio del tomador de decisiones.

La metodología propuesta en este trabajo, está orientada a ser una ayuda a los usuarios que toman decisiones con respecto al aprovechamiento del bosque. El procedimiento ha permitido evaluar y comparar distintos planes de manejo para las plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill., ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas. Al incorporar herramientas computacionales se ha aumentado considerablemente la eficiencia en la obtención de resultados y su posterior análisis.

Palabras claves: manejo forestal, ordenación forestal, planificación forestal, programación lineal, software forestal.

ÍNDICE DE CUADROS

| | | |
|-------------------|---|----|
| Cuadro 1. | Distribución por región y superficie de bosques plantados (ha) por especies hasta el año 2007, en Chile..... | 4 |
| Cuadro 2. | Consumo de madera en troza industrial (m ³ ssc) por tipo de producto y especie, durante el año 2007, en Chile. | 5 |
| Cuadro 3. | Características silvícolas de las masas de <i>Eucalyptus globulus</i> sujetas al estudio, hacia el año 2008. | 25 |
| Cuadro 4. | Ejemplos de software utilizados en algunas actividades de la Planificación Forestal. | 35 |
| Cuadro 5. | Identificación de macro-rodales de las plantaciones de <i>Eucalyptus globulus</i> a ordenar, ubicados en el sitio de calidad buena, hacia el año 2008. | 69 |
| Cuadro 6. | Identificación de macro-rodales de las plantaciones de <i>Eucalyptus globulus</i> a ordenar, ubicados en el sitio de calidad media, hacia el año 2008. | 70 |
| Cuadro 7. | Identificación de macro-rodales de las plantaciones de <i>Eucalyptus globulus</i> a ordenar, ubicados en el sitio de calidad baja, hacia el año 2008. | 71 |
| Cuadro 8. | Solución de los 10 mejores planes de ordenación alternativos, según criterio de maximización del valor presente total del patrimonio (miles de \$), para un patrimonio forestal de 1.200 ha de plantaciones exóticas de <i>Eucalyptus globulus</i> , ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Región de Valparaíso, Chile. | 77 |
| Cuadro 9. | Estadísticas de fragmentación de macro-rodales del patrimonio en estudio, al término de la rotación, por efecto del plan de ordenación Plan7. | 85 |
| Cuadro 10. | Cuenta, superficie y volumen a cosecha en macro-rodales durante el horizonte de planificación, según fragmentación y calidad del sitio forestal, del plan de ordenación Plan7. | 86 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1. | Localización de la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V Región de Valparaíso, Chile..... | 23 |
| Figura 2. | Proceso de desarrollo, coordinación y control en el Manejo Sustentable de bosques prediales o multiprediales, en todos los niveles de la planificación forestal, es decir, operativo, táctico y estratégico..... | 31 |
| Figura 3. | Modelo conceptual del dominio de un sistema de información, desglosado en funciones, que permite solucionar problemas de planificación forestal..... | 33 |
| Figura 4. | Modelo relacional de los objetos de datos de entrada, proceso y salida del software MELISOFT..... | 50 |
| Figura 5. | Modelo fundamental del software MELISOFT..... | 51 |
| Figura 6. | Diagrama de flujo de datos de los objetos de datos que integran MELISOFT..... | 52 |
| Figura 7. | Estructura jerárquica de los componentes del software MELISOFT..... | 52 |
| Figura 8. | Estructura jerárquica de los componentes subordinados al módulo “Ingreso de Datos” del software MELISOFT..... | 53 |
| Figura 9. | Estructura jerárquica de los componentes subordinados al módulo “Reportes” del software MELISOFT..... | 53 |
| Figura 10. | Interfaz gráfica del usuario para los elementos del menú contextual (a) e íconos de inicio rápido de la barra de herramientas (b) del módulo Ingreso de Datos de MELISOFT..... | 54 |
| Figura 11. | Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ingreso de Datos de Planes de Manejo de MELISOFT..... | 56 |
| Figura 12. | Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ingreso de Datos del Patrimonio Actual, para Especies, Sitios y Rodales de MELISOFT..... | 57 |
| Figura 13. | Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ingreso de Datos de Rendimientos de Sitios (Bosque Nuevo) y Rendimientos de Rodales (Bosque Viejo) MELISOFT..... | 58 |
| Figura 14. | Interfaz gráfica del usuario para el módulo Generar Modelo de MELISOFT..... | 59 |
| Figura 15. | Interfaz gráfica del usuario para el módulo Reportes de MELISOFT, donde: a) elementos del menú contextual para los tipos de reportes; b) Visor de reportes..... | 60 |
| Figura 16. | Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ayuda de MELISOFT..... | 61 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 17. | Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar por MELISOFT. | 62 |
| Figura 18. | Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar en el módulo de Ingreso de Datos de MELISOFT. | 63 |
| Figura 19. | Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar en el módulo Generar Modelo de MELISOFT. | 64 |
| Figura 20. | Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar en el módulo Reportes de MELISOFT. | 66 |
| Figura 21. | Gráficos que muestran la proyección de los indicadores de volumen anual a cosechar (m^3 ssc), valor presente neto (miles de \$), valor potencial del suelo (miles de \$) y valor presente total (miles de \$) de las mejores opciones a considerar..... | 78 |
| Figura 22. | Proyección de la superficie (ha) y volumen (m^3 ssc) a cosechar anualmente, por tipo de estructura de la masa forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7. .. | 80 |
| Figura 23. | Proyección de las existencias volumétricas anuales (m^3 ssc) del patrimonio, según sea la estructura de la masa forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7. | 81 |
| Figura 24. | Proyección de la superficie (ha) y volumen (m^3 ssc) a cosechar, por tipo de calidad del sitio forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7..... | 82 |
| Figura 25. | Proyección de las existencias volumétricas anuales (m^3 ssc) del patrimonio, por tipo de calidad del sitio forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7. | 83 |
| Figura 26. | Existencias en superficie (ha) y volumétrica (m^3 ssc) al final de la rotación, por clase de edad del bosque y calidad de sitio, del plan de ordenación óptimo Plan 7. | 84 |
| Figura 27. | Producción anual de volumen (m^3 ssc) durante la segunda rotación del patrimonio en estudio, período de post-conversión del plan de ordenación óptimo Plan 7. | 84 |
| Figura 28. | Proyección de la superficie (ha) y volumen (m^3 ssc) a cosechar anualmente, según la fragmentación de macro-rodiales, del plan de ordenación óptimo Plan 7. . | 87 |

ABSTRACT

The purpose of the following study is to create a connection between the current information technologies and forest planning techniques for sustainable forest management. The need, of planning beings and forest managers, to provide information software that support the decision making, that at the same time allow to speed and facilitate the process of the resolution of these engineering problems, in a precise and timely manner, is imperative and growing.

The main aim of the study was to: “Design and apply an automation software for a model of even-aged forest management in Chile”. The software was designed and built to formulate, resolve and evaluate automatically the Linear Strategic Model (MELI) (Gilchrist, 2006), based in linear programming, that is capable of modelling forests including harvest, thinning, reforestation, varieties of site quality, forest mass structures, application of silvicultural system, cutting cycles and different rotations. Also, it is possible to perform forest regulations through volume flows, cash flows or another objective or combinations between these, according to the criteria of the decision makers.

The proposed methodology in this study, is oriented towards helping users who take decisions with respect to forest use. The procedure has permitted to evaluate and compare different management plans for *Eucalyptus globulus* Labill. plantations, in Lago Peñuelas National Reserve. By incorporating computational tools efficiency in obtaining results and forward analyses was improved.

Key words: forest management, forest ordination, forest planning, linear programming, forest software.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo forestal puede definirse como “el arte y la ciencia de tomar decisiones con el fin de crear, organizar, usar y conservar el bosque”, bajo este enfoque la capacidad de las personas responsables en dar soluciones creativas a las problemáticas que presenta el manejo forestal no es trivial. El definir cuándo, cuánto y dónde aprovechar los recursos forestales de manera que satisfagan las necesidades de la sociedad es un problema económico complejo, el dar solución a éste exige conciliar múltiples demandas económicas, sociales y ambientales del entorno.

La evaluación de las diversas alternativas que se plantean en un plan de manejo forestal está en el ámbito de la planificación, la cual a través de métodos analíticos busca la optimización de la solución que cumpla él o los objetivos planteados por los tomadores de decisiones.

Hoy en día, es indiscutible que el uso de tecnologías complementa y agiliza las labores de planificación forestal. La automatización en procesos de análisis de datos, que antiguamente tomaban mucho tiempo, ha permitido obtener información confiable y de manera oportuna.

La metodología propuesta en este trabajo, está orientada a ser una ayuda a los usuarios que toman decisiones con respecto al aprovechamiento del bosque. El procedimiento ha permitido evaluar y comparar distintos planes de manejo para las plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill., ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas. Al incorporar herramientas computacionales se ha aumentado considerablemente la eficiencia en la obtención de resultados y su posterior análisis.

El presente trabajo de Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal se ha realizado en el marco del Programa de doble titulación existente entre la Universidad de Chile (Chile) y la Universidad de Córdoba (España), en el curso académico 2009-2010.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. PLANTACIONES FORESTALES EN CHILE

2.1.1. Antecedentes generales de la industria forestal

La superficie total de Chile alcanza un total de 75,6 millones de ha, de las cuales un 32,7% son áreas desprovistas de vegetación, 27,1% praderas y matorrales y un 21% corresponde a bosques. De 15,6 millones de ha de bosques, el 85,9% son de bosque nativo, 13,5% de plantaciones forestales y 0,6% de bosques mixtos (CONAF-CONAMA, 1999).

El Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE) cubre aproximadamente 14 millones de ha, de las cuales 3,9 millones de ha son de bosque, y sólo un 0,75% corresponde a plantaciones forestales (CONAF-CONAMA, 1999).

En la actualidad, el sector forestal chileno adquiere cada vez mayor relevancia en el proceso de desarrollo del país. El aporte al Producto Interno Bruto, entre los años 2000 y 2007, promedia alrededor del 3%. Representa al tercer sector exportador de Chile, después de la minería (63,7%) y la industria (20,4%), participando con un 7,3% de las exportaciones nacionales, con un retorno de US\$ 4.951 millones FOB en el año 2007. La Industria Forestal demanda 134.000 empleos directos, relacionados con las actividades de silvicultura y extracción (34%), industria de transformación primaria y secundaria (52,9%) y servicios (13,1%). El consumo total de la industria de la madera es de 38,4 millones de m³ ssc, concentrada principalmente en las plantaciones exóticas de rápido crecimiento, absorbiendo un 71,6% de *Pinus radiata* D. Don, un 26,2% de *Eucalyptus sp.*, un 0,9% de otras exóticas y un 1,3% de especies nativas, provenientes estas últimas desde bosques de Lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser), renales de Raulí (*Nothofagus alpina* (P. et E.) Oerst) y Coihue (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst) fundamentalmente (INFOR, 2008).

Las estadísticas revelan que en las últimas décadas la presión antrópica sobre el bosque nativo ha decrecido. En contraparte, marcan una creciente dependencia económica hacia los monocultivos forestales de especies exóticas, tales como *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.* (Katz *et al.*, 2000).

2.1.2. Distribución y superficie de plantaciones en Chile

Hasta el año 2007, la superficie de las plantaciones en Chile era de 2.299.334 ha. El 91,3% de esta superficie correspondía a bosques artificiales de especies exóticas de *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* (Dean & Maiden), con una participación, con respecto al total del 63,8%, 20,8% y 7% respectivamente (Cuadro 1).

En cuanto a la distribución geográfica de las plantaciones de especies exóticas de mayor importancia se tiene que (Cuadro 1):

- El 91% de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* se distribuyen entre la V Región de Valparaíso y la IX Región de la Araucanía.
- Más del 90% de las plantaciones de *Pinus radiata* se ubican entre la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins y la IX región de la Araucanía.
- La totalidad de las plantaciones de *Eucalyptus nitens* se ubican geográficamente entre la VIII Región del Bío Bío y la X Región de los Lagos.

Las regiones con mayor importancia forestal son la VII del Maule, VIII del Bío Bío y la IX de la Araucanía, en ellas están establecidas el 75% de la superficie de plantaciones del país, fundamentalmente de *Pinus radiata* (Cuadro 1). La concentración de la superficie boscosa y de la capacidad instalada de la Industria de Transformación Primaria de la Madera entre las regiones VII y IX, es una consecuencia del esfuerzo mancomunado entre el Estado y la empresa privada desde el año 1974 hasta la actualidad. La promulgación del Decreto Ley 701 de Fomento Forestal activó la participación privada en el sector, a través de subvenciones que bonificaban el 75% de los costos de forestación y administración predial de plantaciones masivas de *Pinus radiata*. Una política de libre mercado incrementó las exportaciones, e incentivo la inversión industrial, basada en la producción de 3 ó 4 productos (celulosa, madera aserrada, astillas y trozas) (Hartwig, 1994; Katz *et al*, 2000; Bluth, 2002).

Cuadro 1. Distribución por región y superficie de bosques plantados (ha) por especies hasta el año 2007, en Chile.

| Región | <i>Atriplex nummularia</i> | <i>Prosopis Tamarugo</i> | <i>Prosopis chilensis</i> | <i>Populus spp</i> | <i>Pseudotsuga mensiezzi</i> | <i>Pinus ponderosa</i> | Otras Especies | <i>Eucalyptus globulus</i> | <i>Eucalyptus nitens</i> | <i>Pinus radiata</i> | Total | (%) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|-------------|
| I | 9 | 20.635 | 3.246 | | | | 677 | 328 | | | 24.895 | 1,1% |
| II | 44 | 47 | 302 | | | | 801 | 2 | | | 1.196 | 0,1% |
| III | 30 | 12 | 413 | | | | 1.441 | 1.404 | | | 3.300 | 0,1% |
| IV | 58.768 | | 1.139 | | | | 20.204 | 2.634 | | | 82.745 | 3,6% |
| V | | | | 7 | | | 1.776 | 39.065 | | 10.903 | 51.751 | 2,3% |
| RM | | | 5 | 1 | | | 2.538 | 11.369 | | | 13.913 | 0,6% |
| VI | | | | 1.520 | | | 387 | 34.153 | 17 | 66.380 | 102.457 | 4,5% |
| VII | | | | 2.830 | 219 | | 1.959 | 37.565 | 631 | 389.434 | 432.638 | 18,8% |
| VIII | | | | 1.084 | 383 | 172 | 6.356 | 195.198 | 45.275 | 610.124 | 858.592 | 37,4% |
| IX | | | | 367 | 6.845 | 1.896 | 2.549 | 119.975 | 45.044 | 262.430 | 439.106 | 19,1% |
| X | | | | 142 | 643 | 58 | 3.441 | 16.993 | 25.191 | 15.179 | 61.647 | 2,7% |
| XI | | | | 23 | 4.276 | 23.564 | 15.274 | | | | 43.137 | 1,9% |
| XII | | | | | 6 | | 251 | | | | 257 | 0,0% |
| XIV | | | | 421 | 3.703 | 3 | 8.744 | 19.883 | 41.184 | 106.762 | 180.700 | 7,9% |
| Total | 58.851 | 20.694 | 5.105 | 6.395 | 16.075 | 25.693 | 66.398 | 478.569 | 157.342 | 1.461.212 | 2.296.334 | 100% |
| (%) | 2,6% | 0,9% | 0,2% | 0,3% | 0,7% | 1,1% | 2,9% | 20,8% | 6,9% | 63,6% | 100% | |

Fuente. INFOR, 2008.

2.1.3. Consumo y producción de productos forestales

Como se aprecia en la cuadro 2, durante el año 2007 la Industria de Transformación Primaria de la Madera consumió más de 38 millones de m³ ssc de trozas industriales de diversas especies, cuyo principal origen fueron las plantaciones exóticas de *Pinus radiata* (71,6%) y *Eucalyptus sp.* (26,2%).

Las plantaciones de *Pinus radiata* se destinan mayoritariamente para la producción de madera aserrada (55,8%), pulpa de celulosa (30,2%) y tableros y chapas (8%) (Cuadro 2). La producción de madera aserrada de *Pinus radiata* se ha incrementado desde 1,9 millones de m³, hacia el año 1980, hasta 8,3 millones de m³, durante el año 2007, donde una porción del 65% está destinada al mercado nacional y el 35% restante al mercado internacional, las cuales generan divisas por US\$ 562,7 millones FOB en exportaciones a países como México, Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos. Por otro lado, la producción de pulpa de celulosa de *Pinus radiata*, en el año 2007, fue de 2,8 millones de toneladas, donde el 78% se destinó a la satisfacción de la demanda externa, principalmente el mercado asiático, generando divisas por US\$ 1.415,2 millones FOB (INFOR, 2008).

Cuadro 2. Consumo de madera en troza industrial (m³ ssc) por tipo de producto y especie, durante el año 2007, en Chile.

| Producto | <i>Pinus radiata</i> | <i>Eucalyptus sp.</i> | Nativas | Otras exóticas | Total | (%) |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------|
| Madera aserrada | 15.342.236 | 25.794 | 345.294 | 276.764 | 15.990.088 | 41,6% |
| Pulpa | 9.593.377 | 6.188.181 | 0 | 0 | 15.781.558 | 41,1% |
| Tableros | 2.189.421 | 1.800 | 168.486 | 34.324 | 2.394.031 | 6,2% |
| Postes y polines | 172.550 | 17.710 | 0 | 1.000 | 191.260 | 0,5% |
| Cajones | 154.401 | 0 | 0 | 35.235 | 189.636 | 0,5% |
| Astillas | 29.161 | 3.824.009 | 0 | 0 | 3.853.170 | 10,0% |
| Trozas aserrables de exportación | 8.041 | 8 | 1.742 | 0 | 9.791 | 0,0% |
| Trozas pulpables de exportación | 5.782 | 219 | 0 | 0 | 6.001 | 0,0% |
| Total general | 27.494.969 | 10.057.721 | 515.522 | 347.323 | 38.415.535 | 100% |
| (%) | 71,6% | 26,2% | 1,3% | 0,9% | 100% | |

Fuente. INFOR, 2008.

El volumen de trozas industriales consumidas por la Industria de Transformación Primaria de la Madera procedentes de plantaciones de *Eucalyptus sp.*, durante el año 2007, fue de

6,1 millones de m³ ssc (61,5%) para la producción de pulpa de celulosa, y de 3,8 millones de m³ ssc (38%) para la producción de astillas (Cuadro 2). El 89% de la producción de pulpa de celulosa de *Eucalyptus sp.*, es decir, 1,5 millones de toneladas, se destinó al mercado internacional cuyo retorno fue de US\$ 932 millones FOB¹. La producción de astillas fue de 3,6 millones de m³, donde el 88% fue destinado al mercado exterior y el 12% al mercado interno. Cabe destacar, que el 99,5% del volumen de producción de astillas destinadas al mercado nacional es utilizado en la fabricación de pulpa de celulosa (INFOR, 2008).

2.1.4. Silvicultura de plantaciones

Un regimen silvicultura corresponde a “una secuencia o programa de actividades culturales que se realizan a lo largo de la vida de un rodal, con la intención de lograr un objetivo predefinido” (Bown, 1998). En efecto, un régimen especifica la oportunidad, intensidad y los atributos técnicos de las actividades silvícolas a realizar en el rodal. No obstante, la elección de un régimen silvicultural para un sitio forestal específico, que logre los objetivos de manejo no es una tarea fácil, si se considera que éste es una combinación única de factores atribuibles al bosque, la industria y el mercado (Bown, 1998).

La intensidad de la silvicultura se refiere al mayor o menor uso de los factores de producción tierra, capital, trabajo y tecnología por cada hectárea de bosque. En consecuencia, existe una relación directa entre la inversión en factores de producción y la intensidad de la silvicultura. Se justifica una mayor intensidad en la silvicultura, si mayor es la productividad de una especie y, más alto valor de su madera; si mayor es la calidad de los sitios forestales y, si mayor es la disposición a pagar de los demandantes por el producto (Bown, 1998).

¹ FOB (*Free on Board*):”Incoterm o término de venta: el vendedor tiene la obligación de cargar la mercancía a bordo del buque en el puerto de embarque especificado en el contrato de venta. El comprador selecciona el buque y paga el flete marítimo. La transferencia de riesgos y gastos se produce cuando la mercancía rebasa la borda del buque. El vendedeor se encarga de los trámites para la exportación” (PROCHILE, 2008).

2.1.4.1 *Plantaciones de pino insigne*

Los principales objetivos de producción para las plantaciones de *Pinus radiata* es la obtención de productos maderables de calidad suficiente para competir en el mercado nacional e internacional de madera libre de nudos y de madera pulpable (Gerding, 1991).

Esquema Silvícola para Madera libre de nudos

Preparación del sitio: Quema de residuos y preparación mecánica con subsolado o arado (Gerding, 1991).

Establecimiento: Densidad inicial entre 1.000 – 1.600 árboles/ha. Plantación realizada en la temporada invernal. Control químico de malezas en primavera. Fertilización rica en boro en suelos graníticos, rojos arcillosos y arenosos. Antes del cierre de copas, año 4 ó 5, limpia manual de malezas (Gerding, 1991).

Poda: Primera poda a realizar 4 – 5 años, cuando la altura dominante se encuentra entre 5 – 6,5 m. Es posible realizar de dos a cinco podas, hasta alcanzar trozas libres de nudos superiores a los ocho metros. La intensidad de la poda varía entre el 50% - 60% de la copa viva. Sólo se realiza a los árboles residuales de los raleos², es decir, los de mayor vigor y calidad (Gerding, 1991).

Raleo: Generalmente son por lo bajo. Primer raleo de desecho entre los 4 – 6 años, antes de la poda, se reduce entre un 50% -60% de la densidad inicial de plantación. Es posible realizar uno o dos raleos comerciales, entre los 9 – 12 años el primero y 13 – 16 años para el segundo. Se disminuye la densidad hasta 250 – 400 árboles/ha. El rendimiento promedio para un raleo comercial oscila entre los 10 – 65 m³/ha (Gerding, 1991).

Corta final: La rotación del árbol varía entre los 24 – 30 años, con rendimientos entre 300 – 500 m³/ha. El diámetro mínimo de utilización del fuste está entre 7 – 10 cm. Los desechos son arrumados en el terreno, para su posterior quema (Gerding, 1991).

² En este trabajo se utiliza la terminología forestal aceptada en el uso común en Chile

Esquema Silvícola Pulpable

Preparación del sitio: Quema de residuos y preparación mecánica con subsolado o arado (Gerding, 1991).

Establecimiento: Densidad inicial entre 1.000 – 1.600 árboles/ha. Plantación realizada en la temporada invernal. Control químico de malezas en primavera. Fertilización rica en boro en los suelos graníticos, rojos arcillosos y arenosos. Antes del cierre de copas, año 4 ó 5, limpia manual de malezas (Gerding, 1991).

Poda: No se realizan actividades que mejoren la calidad de la madera (Gerding, 1991).

Raleo: Generalmente son por lo bajo. Pueden realizarse un raleo de desecho .y uno o dos raleos comerciales. La densidad final es de 300 – 500 árboles/ha. El rendimiento de esta actividad varía entre 30 – 70 m³/ha (Gerding, 1991).

Corta final: La rotación del árbol varía entre los 18 – 25 años, con rendimientos entre 350 – 800 m³/ha dependiendo del tipo de manejo del bosque. El diámetro mínimo de utilización del fuste está entre 7 – 10 cm. Los desechos son arrumados en el terreno, para su posterior quema (Gerding, 1991).

Sin Esquema Silvícola

También existen plantaciones forestales sin ningún tipo de esquema silvícola a aplicar, muchos de ellos están en manos de pequeños propietarios, con sitios forestales ya muy degradados. Suelen realizarse raleos motivados por las necesidades económicas, y es muy común que se realicen podas tardías. La edad de rotación oscila entre los 25 – 30 años. Los rendimiento suelen fluctuar entre 200 – 1.200 m³/ha, dependiendo del sitio y la edad de rotación (Gerding, 1991).

2.1.4.2 Plantaciones de eucalipto

Generalmente, las plantaciones de *Eucalyptus sp.* tienen como objetivo de producción la obtención de madera pulpable, es decir, trozas de pequeñas dimensiones para la fabricación

de pulpa de celulosa, astillas y la generación de energía. Aunque también existe la producción de madera aserrable y/o foliable (Sotomayor *et al.*, 2002).

Manejo del Monte Alto - Esquema Silvícola Pulpable

Este tipo de esquema silvícola considera el mínimo de intervenciones intermedias en la plantación, ya que sólo interesa la producción de fibra y no la forma de los fustes (Sotomayor *et al.*, 2002).

Preparación del sitio: Se habilita el terreno de plantación a través de un roce manual o mecánico, para un posterior ordenamiento de los desechos en forma lineal o puntual. Los desechos pueden permanecer o bien ser retirados del bosque, para este último el material es convertido en astillas por medio de trituradoras, cuyo objetivo es proveer de materia prima a fábricas de generación de energía en base a la biomasa forestal (Sotomayor *et al.*, 2002).

Establecimiento: Se planta a densidades entre 1.250 – 1.600 arb/ha, durante la época invernal. Se realiza control de malezas por método manual, mecánico o químico, dependiendo del sitio. La fertilización se realiza bajo el mismo criterio anterior (Sotomayor *et al.*, 2002).

Corta final: La rotación del árbol varía entre los 12 – 24 años, con rendimientos entre 350 – 800 m³/ha dependiendo del tipo de manejo del bosque. El diámetro mínimo de utilización del fuste está entre 7 – 10 cm. Los desechos son ordenados en el terreno siguiendo la curva de nivel, posteriormente se evalúa si manejar los retoños o plantar nuevamente (Sotomayor *et al.*, 2002).

Manejo del Monte Bajo

Aunque todavía no se han validado esquemas silvícolas para el monte bajo de la mayoría de las especies del género *Eucalyptus sp.* plantadas en Chile, algunos investigadores recomiendan esta opción como viable para plantaciones de segunda rotación de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus viminalis* Labill., para la producción de madera pulpable y leña (Sotomayor *et al.*, 2002; Geldres *et al.*, 2004).

Tipos de rebrotes de la cepa: Existen tres tipos de rebrotes de la cepa de eucalipto, las cuales son: brote adventicio, brote epicórnico, brote del lignotubérculo. El brote adventicio se forma en la cara transversal del tocón, entre el floema y el xilema de este. Los brotes epicórnicos se originan en la superficie del floema y en la parte exterior del tocón. Los brotes del lignotubérculo, se generan en el suelo muy cercanos a las raíces. En cuanto al vigor, sobrevivencia y crecimiento, los brotes epicórnicos muestran mejores índices que los otros dos (Prado y Barros, 1991).

Época de Corta: la cosecha del rodal de eucalipto debiera ser al inicio del período vegetativo, es decir, al principio de la primavera. El objetivo es disminuir la mortalidad de las cepas y favorecer el retoño (Gilchrist y Toral, 2007).

Altura de Corte: Debe ser lo más cercano al suelo, entre 10 a 15 cm sobre éste. El objetivo es disminuir la pérdida de madera cosechada y aumentar la resistencia de los rebrotes al viento (Gilchrist y Toral, 2007).

Manejo de retoños: el primer clareo se realiza al tercer año de retoñación, se establecen a lo más tres retoños por tocón. A los cinco años de retoñación se lleva a cabo el segundo clareo, sólo dos vástagos deben permanecer en la cepa. Luego, entre los 9 – 10 años se ejecuta el tercer clareo, el mejor retoño, en cuanto a atributos de calidad y cantidad, permanecerá en la cepa hasta el final del turno del rodal. El objetivo es mantener la competencia entre los retoños, conservar la estructura de monte bajo regular del rodal y la obtención de algunos productos comerciales al final de la primera década (Gilchrist y Toral, 2007).

Oportunidad de Clareos: La oportunidad del primer clareo depende de la selección natural de los retoños, tomando en cuenta la competencia entre los vástagos de la cepa y la interacción del individuo con los factores ambientales, principalmente el viento. Es así que suelen ser los retoños más fuertes y vigorosos, aquellos que se encuentran a barlovento de la cepa. Es probable que la oportunidad del primer clareo sea al tercer o cuarto año después del retoño. Posterior al primer clareo, la oportunidad depende de la competencia en el rodal y su efecto sobre el crecimiento del árbol (Gilchrist y Toral, 2007).

Renovación total y replante parcial: Después de la tercera rotación de un rodal, es necesario renovar todas las cepas, y así no afectar la productividad de la especie en el sitio, como consecuencia de la baja vigorosidad del tocón. Para cambiar la cepa es posible utilizar métodos manuales, tales como cortar a ras de suelo, descortezar la cepa y luego taparla con una capa de tierra de mínimo 30 cm, o métodos químicos aplicados sobre el tocón o el follaje. Cuando más del 25% de los tocones no produzcan rebrotes, ya sea por senectud, pudrición u otro daño, es necesario realizar el replante sobre el rodal (Gilchrist y Toral, 2007).

2.1.5. Certificación de plantaciones

Luego de la participación de Chile en la Conferencia de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992) en Río de Janeiro, se impulsó la definición de criterios e indicadores para la conservación de recursos naturales y el manejo forestal sustentable de acuerdo a la realidad del país. La Certificación Forestal, es un mecanismo que ofrece a las empresas, nuevas oportunidades en el mercado exterior ofreciendo mejores precios para sus productos. Hasta fines del año 2002, habían en Chile diez empresas forestales certificadas bajo la Norma ISO 14001, abarcando una superficie de 1,67 millones de ha, de las cuales 1,1 millones de hectáreas pertenecen a plantaciones. Bajo el Estándar FSC (*Forest Stewardship Council*), habían 351.965 ha certificadas de plantaciones y bosque nativo, además 17 empresas forestales habían certificado su Cadena de Custodia bajo este sistema, el cual sigue la trayectoria de la madera desde el bosque al producto final (Manosalva, 2004).

2.2. ORDENACIÓN FORESTAL

2.2.1. Conceptos Generales

La ordenación forestal sostenible tiene como objeto fundamental asegurar que todos los bienes y servicios que el bosque provea satisfagan las necesidades actuales y futuras de la sociedad de manera continua (FAO, 2006).

Según Gilchrist (2006), ordenar el patrimonio forestal implica responder dónde, cuándo, cuánto y qué aprovechar con las actividades forestales, buscando siempre que los bosques cumplan plenamente sus funciones, siendo necesario que éste perdure en el tiempo.

Los métodos clásicos de ordenación forestal tienden a transformar una superficie que no está regulada, en una completamente regulada. Un bosque regulado, es aquel que tiene una estructura en la cual todas las clases de edad se encuentran representadas. El lapso que se tarda en pasar de un bosque no regulado a uno regulado se denomina período de conversión, posterior a éste se encuentra el período de post-conversión. Los métodos de ordenación están basados generalmente en dos principios (Gilchrist, 2006):

- Regulación por superficie: donde el patrimonio está dividido en tantas partes iguales según sean los años de la rotación señalada.
- Regulación por volumen: donde se determina el volumen a cosechar en forma periódica, ya sea por métodos heurísticos o analíticos.

La regulación también puede realizarse bajo cualquier otro objetivo que se quiera o por alguna combinación de estos, como por ejemplo: empleo, ingresos, costos, valor presente neto, biodiversidad, entre otras. En la regulación, no es necesario que los cuarteles sean contiguos, ni tampoco que sean ordenados en forma secuencial (Gilchrist, 2006).

2.2.2. Planificación Jerarquizada en Ordenación Forestal

La Ordenación Forestal integra procesos de planificación, gestión y control. La planificación comprende un diagnóstico de la situación, la declaración de metas y objetivos prioritarios, la evaluación de alternativas y una toma de decisiones. El planificador busca una solución que cumpla los objetivos estipulados, bajo las restricciones económicas, sociales y ambientales impuestos. La gestión, comprende la ejecución de las actividades planificadas. El proceso de control consiste en la revisión y comparación de las actividades planificadas y ejecutadas (Madrigal, 1994; Armitage, 1999).

Una forma de simplificar los problemas complejos de la Ordenación Forestal es el empleo de un enfoque jerárquico de decisión en la planificación. Los niveles de decisión se

clasifican según el plazo de acción de éstas, diferenciándose en decisiones de largo, mediano y corto plazo (Morales y Weintraub, 1989).

La planificación estratégica, utiliza horizontes entre 20 y 60 años, resuelve problemas de expansión o contracción de la empresa y/o del patrimonio, de inversiones en plantas industriales y de declaración de objetivos silviculturales, entre otros (Morales y Weintraub, 1989; Rönnqvist, 2003). Gunn (2007), expone que los modelos estratégicos son útiles para evaluar una determinada estrategia, además expone la inclusión de un nuevo paradigma al proceso decisional, el manejo forestal sustentable, otorgando un mayor énfasis a la gestión de los ecosistemas y un menor énfasis a la producción maderera.

A nivel táctico, el horizonte de planificación es de aproximadamente tres años, se decide sobre los rodales a cosechar (planes de cosecha) y cuales son los accesos necesarios para realizar de manera eficiente dicha producción (Morales y Weintraub, 1989; Rönnqvist, 2003). Modelos más modernos incluyen, aparte de las actividades de cosecha forestal y construcción y/o mantención de caminos, acciones de protección ambiental, como por ejemplo el resguardo de zonas riparias, el manejo del combustible del bosque, entre otras. La tarea de un modelo táctico es de servir de puente entre los niveles estratégicos y operacionales de la planificación (Church, 2007).

En los niveles operativos se decide sobre la asignación de maquinarias, transporte y equipos en planes diarios, semanales y mensuales de la organización forestal (Morales y Weintraub, 1989; Rönnqvist, 2003). Según Epstein *et al.* (2007), todavía existe un gran margen de progreso en esta materia. El desarrollo de modelos, de tecnologías de información y, de la comunicación en tiempo real, vislumbra hacia el futuro la optimización de las operaciones en toda la cadena productiva forestal.

Emplear el enfoque jerárquico en la planificación forestal es muy útil en la toma de decisiones. Para lograrlo es preciso obtener, a través de una adecuada agregación y desagregación, la consistencia y coherencia de la información y decisiones en todos los niveles de planificación. En la práctica, se construyen modelos separados para los niveles estratégico, táctico y operativo (Morales y Weintraub, 1989; Gilchrist, 2006).

2.2.3. Modelos de Planificación Estratégica Basados en Programación Lineal

2.2.3.1 *Principales Directrices Metodológicas*

La programación lineal, técnica de la Investigación de Operaciones, ha sido usada desde la década del sesenta en la búsqueda de soluciones óptimas a problemas de ordenación forestal (Buongiorno y Gilles, 2003). Este procedimiento ha demostrado ser conveniente en su aplicación a sistemas de producción forestal (Morales y Weintraub, 1989; Rönnqvist, 2003; Gilchrist, 2006).

Un modelo de programación lineal representará satisfactoriamente un problema complejo del manejo forestal cuando se cumplan los supuestos de esta técnica de optimización, presentados a continuación (Buongiorno y Gilles, 2003):

- **Proporcionalidad:** En un modelo de programación lineal cualquier contribución de una actividad a la función objetivo es directamente proporcional al nivel de la actividad. El nivel está dado como un incremento o decremento. Por ejemplo, la contribución del manejo de una plantación forestal a la función objetivo, es directamente proporcional a la superficie que se gestiona.
- **Aditividad:** En un modelo de programación lineal se asume que la contribución de todas las actividades a la función objetivo es igual a la suma de la contribución individual de cada actividad, considerando a cada actividad como independiente de otra.
- **Divisibilidad:** en un modelo de programación lineal se asume que todas las actividades son continuas y pueden tomar cualquier valor positivo.
- **Determinismo:** un modelo de programación lineal es determinístico y no probabilístico o estocástico. En el cálculo de una solución, no se toma en cuenta que los coeficientes del modelo son sólo aproximaciones. Por esta razón, es necesario calcular varias soluciones, diferentes entre ellas y que sean razonables, asumiendo distintos valores de los parámetros. El análisis post-óptimo pone de manifiesto la sensibilidad de una solución a cambios en los valores de los parámetros.

Debido a la magnitud y complejidad de los problemas de planificación forestal estratégica, las decisiones se agregan a superficies, sus características y las actividades a realizar en ellas. Los planes de manejo estratégicos tienen como objetivo maximizar el volumen de cosecha en forma sostenida, de preferencia con flujos periódicos constantes. Los modelos incluyen la maximización del valor presente del patrimonio como función objetivo, sujeto a restricciones lineales de disponibilidad de los recursos, el flujo de la cosecha, la demanda de la industria y las preocupaciones medioambientales, entre otras. Típicamente, este tipo de problemas han sido abordados con modelos de programación lineal, modelando cientos de áreas, con horizontes de planificación entre 10 y 50 períodos. Además, se cuenta con diferentes alternativas para cada área, resultando en modelos con miles de variables de decisión y restricciones (Rönnqvist, 2003).

A continuación, se explican brevemente algunos modelos estratégicos, basados en programación lineal, que han marcado las directrices metodológicas en la Ordenación Forestal:

- Modelo de Curtis (1962): regula por superficie, sólo puede ser aplicado un tratamiento silvicultural, no incluye reforestación ni raleos.
- Modelo de Loucks (1964): regula por volumen, pudiendo restringir el modelo a un control por superficie o por volumen, sólo puede ser aplicado un tratamiento silvicultural, no incluye reforestación ni raleos.
- Modelo Dinámico (Nautiyal y Pearse, 1967): regula por volumen, incluye reforestación, los rodales se fraccionan durante el Período de Conversión, no incluye raleos.
- Modelo I (Johnson y Scheurman, 1977): regulan por volumen, incluye cosechas y reforestación, pueden incorporarse múltiples tratamientos silviculturales, mantiene la identidad de los rodales.
- Modelo II (Johnson y Scheurman, 1977): regulan por volumen, incluye cosechas, raleos y reforestación, pueden aplicarse varios tratamientos silviculturales, no mantiene identidad de los rodales.

- Modelo FOLPI (García, 1984): cuya sigla en inglés significa *Forestry – Oriented Linear Programming Interpreter*, incluye cosechas y raleos, mantiene la identidad de los *croptypes*, es flexible a los cambios de tratamientos silviculturales.

En sí, ningún modelo de programación lineal es superior a otro, la bondad de cada uno dependerá de los objetivos trazados por el tomador de decisiones y por su entendimiento del problema a resolver, en cuanto al comportamiento del bosque y su manejo (Bown, 2007).

2.2.3.2 Complementos entre Simulación y Programación Lineal

Las técnicas de simulación y programación lineal son complementarias en el ámbito de la ordenación forestal. Las funciones de producción de uno o más objetivos que se deseen optimizar en el patrimonio forestal son indispensables al momento de formular un programa lineal (Gilchrist, 2006). Por esta razón, es necesario explicar algunos conceptos sobre la simulación del comportamiento del bosque.

Los simuladores de crecimiento de rodal, son modelos matemáticos de origen determinístico o estocástico, que permiten efectuar interpolaciones entre datos reales que han sido recolectados de la experimentación en terreno (Morales *et al*, 1981). Estos permiten predecir los rendimientos futuros de un bosque, estudiando el efecto de los tratamientos silviculturales sobre él (Vanclay, 1994).

Según el nivel de agregación de los componentes de un rodal, los modelos pueden clasificarse en (Morales *et al*, 1981; Vanclay, 1994):

- Modelos de rodal: simulan el crecimiento considerando variables de estado a nivel agregado del rodal, como por ejemplo: área basal, número de árboles por hectárea, altura dominante, volumen de madera, entre otras. Se pueden deducir información acerca de las distribuciones diamétricas, pero no así de árboles individuales.
- Modelos de distribuciones diamétricas: proyectan el comportamiento del árbol promedio de cada clase diamétrica. Estos modelos se posicionan entre los modelos de rodal y de árboles individuales, según sea el tamaño de la clase.

- Modelos de árbol individual: modelan los árboles de un rodal de forma individual, requieren de un gran volumen de datos para su construcción y pueden llegar a ser muy complejos. Existen modelos que son dependientes e independientes de la distancia entre árboles.

La calidad del sitio va a determinar la magnitud de crecimiento de un rodal, usualmente las variables que se utilizan para describir estas áreas son: ubicación geográfica (latitud, longitud, altitud, fisiografía, geomorfología), propiedades edáficas (textura, profundidad, hidromorfismo) y formaciones vegetales (Morales *et al.*, 1981).

La mayoría de los simuladores de crecimiento utilizan el índice de sitio para expresar la calidad del sitio, la cual expresa la altura dominante que tendría un rodal, a una edad clave, sin que hubieran alteraciones ambientales o antrópicas que la modifiquen (Morales *et al.*, 1981).

La capacidad de los modelos de crecimiento para estimar correctamente la producción en sitios que están desnudos o cubiertos de bosque, radica en la utilización de variables predictoras independientes entre si, tales como variables ambientales y antrópicas, y en menor medida de las variables de estado del rodal (Gilchrist, 1978).

Dependiendo de la información disponible y la requerida por el usuario, varía el nivel de detalle y complejidad en la construcción del simulador (Morales *et al.*, 1981).

2.3. TECNOLOGÍA COMPUTACIONAL EN EL SECTOR FORESTAL

2.3.1. Antecedentes Generales

El advenimiento de la tecnología computacional ha provocado una revolución científica similar a la del descubrimiento del cálculo diferencial e integral. Algunos problemas matemáticos, que hace apenas 50 años ni siquiera se pensaba en resolver, ahora son solucionados en pocos segundos por un computador personal. En la actualidad, los computadores pueden determinar fácilmente, a través de instrucciones programadas de algoritmos, la mejor solución a problemas matemáticos que poseen miles de variables y restricciones. Se busca la optimización, es decir, no sólo la búsqueda de una solución, sino

la mejor solución posible dentro de un número infinito de soluciones (Buongiorno y Gilles, 2003).

Recientemente se ha integrado un nuevo paradigma que interrelaciona las ciencias forestales y la tecnología digital denominado *Digital Forestry*, cuyo concepto principal radica en la sistematización en la adquisición, integración, análisis y aplicación de la información digital para el manejo sustentable de los bosques. Esta nueva disciplina, nace en virtud de la necesidad de crear un nexo entre la tecnología computacional y el manejo sustentable de los bosques (Shao y Reynolds, 2006).

La tecnología computacional aplicada al ámbito forestal ha experimentado un fuerte desarrollo en áreas específicas, tales como: teledetección con sensores remotos, sistemas de información geográfica, modelación y simulación forestal, visualización forestal y apoyo a la toma de decisiones en la gestión de bosques (Shao y Reynolds, 2006).

2.3.2. El Software en la gestión de bosques

El software “es un transformador de información, produciendo, gestionando, adquiriendo, modificando y mostrando o transmitiendo información tan simple como un bit, o tan compleja como una presentación multimedia”. Está compuesto por programas, datos y documentos, elementos que se configuran en el proceso de ingeniería del software, el cual proporciona un marco metodológico para construir un software de mayor calidad (Pressman, 2002).

El software es un elemento lógico, y no físico, del sistema de información en el cual opera. Esta cualidad, otorga ciertas características al producto, tales como (Pressman, 2002):

- El software se desarrolla: al no ser un producto físico, el proceso de control de calidad y construcción requiere un enfoque diferente al tradicional.
- El software no se “estropea”: una vez implementado, la tasa de fallos del producto decrece conforme avanzan las etapas del ciclo de vida del software. Aunque, este no está exento del deterioro, debido a los cambios que estará expuesto en la corrección

de fallos generados por errores en las fases de diseño y codificación a lenguaje de computador.

- La gran mayoría del software está construido a medida: todavía es baja la utilización de componentes estándar de algoritmos y/o estructuras de datos en el diseño y construcción de software.

Las aplicaciones potenciales del software son extremadamente amplias. Por ejemplo, algunos nichos de desarrollo están en la generación de: software de sistemas, software de tiempo real, software de gestión, software de ingeniería y científico, software de computadores personales, software basados en web y software de inteligencia artificial (Pressman, 2002).

Múltiples tecnologías de software han sido implementadas para la toma de decisión en la gestión de bosques en las últimas décadas. Estos incluyen enfoques de sistemas de optimización, sistemas expertos, modelos basados en la teoría de redes neuronales, métodos multicriterio, y otros sistemas complejos que integran las anteriores (Reynolds y Schmoldt, 2006).

Junto con el creciente desarrollo de modelos de optimización para la ordenación forestal, se han ampliado las aplicaciones computacionales para dicha tarea. Por nombrar algunos, se tiene:

- Sistema SPECTRUM utilizado por el Servicio Forestal de Estados Unidos (USDA Forest Service, 2005).
- Sistema FOLPI utilizado por el Instituto Forestal de Nueva Zelanda (García, 1984).
- Sistema MEDFOR utilizado por empresas forestales privadas en Chile (Epstein *et al.*, 1999).
- Sistema MELA desarrollado en Finlandia (Siitonen *et al.*, 2000).

Reynolds y Schmoldt (2006) especulan, sin estar libre de riesgos en su proposición, que el desarrollo futuro del software para la gestión forestal tomará las siguientes direcciones:

software en tiempo real basadas en tecnología web, sistemas informáticos que se integren y/o colaboren con otros ya creados y sistemas informáticos que incluyan el componente social en la toma de decisiones a nivel participativo.

3. HIPÓTESIS

La utilización de una tecnología computacional de software para el apoyo a la toma de decisiones en la ordenación forestal sustentable de bosques coetáneos, basado en un modelo de programación lineal de planificación territorial, permitirá al ente gestor del bosque contar con información confiable y oportuna, para comparar y seleccionar, bajo criterios objetivos, el mejor plan de cosechas y raleos de un patrimonio forestal, ajustado a los objetivos, metas, restricciones y políticas que la organización defina.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y aplicar un software de automatización para un modelo de Ordenación forestal de bosques coetáneos en Chile.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y programar un software que automatice el proceso de formulación y resolución del Modelo Estratégico Lineal (MELI) para la ordenación forestal en bosques coetáneos.
- Validar el software desarrollado, analizando un caso real de ordenación forestal en plantaciones coetáneas de *Eucalyptus globulus* pertenecientes a la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V Región de Valparaíso, Chile.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. MATERIALES

5.1.1. Ubicación y descripción del área de estudio

5.1.1.1 Medio físico

La zona de estudio seleccionada para el trabajo de validación del software desarrollado se encuentra situada en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, perteneciente al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), localizada en la Cordillera de la Costa en las coordenadas UTM 19H 266508 S y 6328229 E, Provincia de Valparaíso, V Región de Valparaíso, Chile (Figura 1).

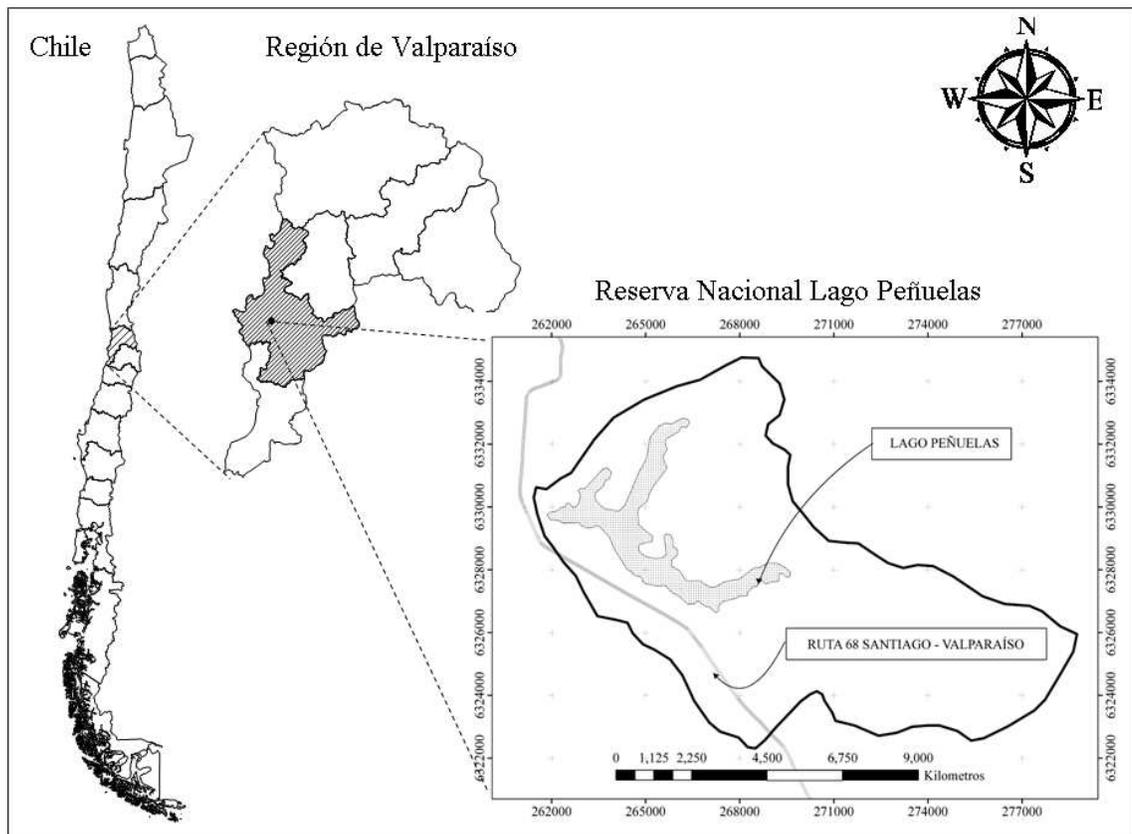


Figura 1. Localización de la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V Región de Valparaíso, Chile.

El clima predominante en el área es Templado – Cálido con lluvias invernales, estación seca prolongada, de siete a ocho meses, y gran nubosidad, la temperatura media anual es de 15° C y la precipitación media anual supera los 370 mm (Dirección Meteorológica de Chile, 2009). Los suelos de la zona se derivan de materiales granitoídeos, lo que permite diferenciarlo en altura. Los sitios con mayor productividad se encuentran en las cotas superiores, donde el suelo posee horizontes arcillosos de abundante grava de cuarzo. En cotas inferiores el material parental está altamente intemperizado, situación que facilita los procesos erosivos muy típicos de esta zona, tal cual es la erosión de manto y zanjas (Peralta, 1971).

5.1.1.2 *Estado silvícola*

La superficie del área de estudio es de 92.603 ha, de las cuales aproximadamente 1.200 ha corresponden a plantaciones puras de *Eucalyptus globulus*, posicionadas en el sector norte de la reserva, y que son susceptibles a la ordenación forestal. El área de análisis, presenta tres diferencias significativas en la calidad del suelo, las cuales se ven representadas en los índices de sitio para *Eucalyptus globulus*, a la edad clave de 20 años, en 37,8 metros, 31,7 metros y 25,5 metros para sitio denominados como calidad buena, calidad media y calidad baja respectivamente (Cuadro 3).

El patrimonio a ordenar está conformado por 156 rodales de eucalipto, donde 58 de éstos (37% del total) se ubican en el sitio de calidad media ($IS_{20} = 31,7$ m) y tienen estructura de monte bajo. Respecto a la distribución de la superficie del patrimonio a ordenar, se tiene que: el 73%, 19% y 8% se distribuye en el sitio de calidad media ($IS_{20} = 31,7$ m), sitio de calidad baja ($IS_{20} = 25,5$ m) y sitio de calidad buena ($IS_{20} = 37,8$ m) respectivamente; el 35%, 36% y 29% se distribuye en las plantaciones con estructura de la masa forestal de monte alto, monte medio y monte bajo respectivamente. El volumen acumulado, hacia el año 2008, es de aproximadamente 175.507 m³ ssc en pie (Cuadro 3). El rango de edad de los rodales es de dos a 43 años, aunque no todos los años están representados en una superficie de plantación, es decir, el patrimonio no se encuentra regulado por superficie (Apéndice III, material acompañante digital).

Cuadro 3. Características silvícolas de las masas de *Eucalyptus globulus* sujetas al estudio, hacia el año 2008.

| Índice de sitio | Estructura de la masa | Cuenta de rodales | Superficie acumulada (ha) | Volumen total (m ³ ssc) | Participación superficie (%) | |
|---|-----------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| | | | | | Sitio por estructura | Sitio en patrimonio |
| Sitio calidad baja IS ₂₀ = 25,5 m | Monte alto | 2 | 41,8 | 3.368 | 18% | |
| | Monte medio | 12 | 177,6 | 20.633 | 78% | 19% |
| | Monte bajo | 4 | 9 | 402 | 4% | |
| | Total | 18 | 228,4 | 24.403 | 100% | |
| Sitio calidad media IS ₂₀ = 31,7 m | Monte alto | 24 | 358,7 | 41.547 | 41% | |
| | Monte medio | 36 | 245,7 | 74.978 | 28% | 73% |
| | Monte bajo | 58 | 275,6 | 15.069 | 31% | |
| | Total | 118 | 880 | 131.594 | 100% | |
| Sitio calidad buena IS ₂₀ = 37,8 m | Monte alto | 3 | 18,3 | 8.385 | 19% | |
| | Monte medio | 7 | 14,2 | 5.763 | 14% | 8% |
| | Monte bajo | 10 | 65,7 | 5.363 | 67% | |
| | Total | 20 | 98,2 | 19.510 | 100% | |
| Total | | 156 | 1.206,6 | 175.507 | | 100% |

Para más detalle del estado silvícola del patrimonio a ordenar, referirse al material acompañante digital (Apéndice III).

5.1.2. Información primaria y secundaria

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) proporcionó la información básica, actualizada al año 2008, concerniente a los datos dasométricos de los rodales, historial de intervenciones silviculturales aplicados en la unidad de manejo, funciones de crecimiento y rendimiento para plantaciones (Anexo I) según estructura, sitio y número de árboles por hectárea, cartografía actualizada de la Reserva Nacional Lago Peñuelas. Por otro lado, la información secundaria son todos los antecedentes que se fueron recopilados desde bibliotecas y páginas electrónicas especializadas.

5.1.3. Equipamiento

El equipamiento utilizado en el diseño y construcción del software, procesamiento de datos y la redacción de la memoria fueron un computador personal (Pentium IV con sistema

operativo Windows XP) y programas computacionales específicos para cada tarea. Estos últimos son: Microsoft Visual Basic 6.0, Setup Factory 8.0, Shalom Help Maker 0.6.1, software de optimización lineal LPSOLVE 5.5, SigmaPlot 10.0, Microsoft Access 2003, Microsoft Excel 2003, Microsoft Word 2003, Microsoft Visio 2003.

5.2. MÉTODOS

5.2.1. Diseño y construcción del software

El software fue diseñado y construido para formular, resolver y evaluar automáticamente el Modelo Estratégico Lineal o MELI, basado en optimización lineal. Éste es un modelo de planificación forestal estratégica que ha sido desarrollado por Gilchrist (2006) y es utilizado ampliamente en las cátedras de Manejo Forestal I y II, dictadas en el Departamento de Gestión Forestal y su Medio Ambiente, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. MELI es capaz de modelar el bosque incluyendo cosechas, raleos, reforestación, distintas calidades de sitio forestal, estructura de la masa forestal, aplicaciones de tratamientos silvícolas, ciclos de corta y diferentes rotaciones. Además, es posible regular el patrimonio forestal por flujos de volumen, flujos financieros u otro objetivo o combinaciones de estos, según sea el criterio del tomador de decisiones. La formulación general y supuestos de MELI, se encuentra en el Apéndice I del presente documento.

Para el desarrollo del software de automatización se utilizó el modelo lineal secuencial o modelo en cascada, el cual sugiere un enfoque sistemático y secuencial del proceso. El modelo lineal comprende las siguientes etapas (Pressman, 2002):

- Ingeniería y modelado de sistemas de información: antes de comenzar con la construcción del software, fue necesario comprender el sistema en donde residirá. Se analizaron los elementos que integran el sistema, tales como: software, hardware, personas, documentación y procedimientos; los cuales se combinan de diversas maneras para transformar la información.

- Análisis de los requisitos del software: esta fase permitió especificar las características operacionales del software con respecto a la funcionalidad, datos, rendimientos, interfaces y restricciones que deben ajustarse al desarrollo.
- Diseño: es la representación significativa del software que se construyó. Estuvo centrado en cuatro áreas importantes, tales como estructura de datos, arquitectura del software, representaciones de interfaces y detalle procedimental. El diseño de la base de datos se realizó con el software Microsoft Access 2003. La interfaz gráfica del usuario fue diseñada utilizando los controles visuales incorporados en Microsoft Visual Basic 6.0. Para la confección de diagramas de flujo de información, fase de arquitectura y detalle procedimental, se utilizó el software Microsoft Visio 2003.
- Generación de código: se tradujo el diseño del software a un lenguaje que sea legible por la computadora. El software desarrollado, desde ahora MELISOFT 1.0, fue codificado y compilado en el lenguaje de programación Microsoft Visual Basic 6.0. La aplicación incluyó la *application programming interface* (API) del solver LPSOLVE 5.5 compatible con Microsoft Visual Basic 6.0, para resolver internamente los modelos lineales utilizando las funciones de dicho software. A continuación, se procedió a empaquetar la aplicación, con el objeto de facilitar su posterior distribución, con el software Setup Factory 8.0. El archivo de ayuda de MELISOFT 1.0 fue escrito, programado y compilado con el software Shalom Help Maker 0.6.1.
- Pruebas: este proceso consistió en la realización de pruebas para detectar errores y corregirlos, con el fin de asegurar que las entradas del sistema generen los resultados requeridos. Se realizarán sesiones de prueba beta con usuarios finales del software.
- Mantenimiento: posterior a la entrega del software, es muy probable que se encuentren errores o requerimientos de modificaciones para mejorar su funcionalidad o rendimiento. Esta fase no se contempló en el proyecto, ya que se consideró satisfactorio la etapa de pruebas en la depuración del software.

5.2.2. Validación del software en análisis de caso

La validación de la funcionalidad del software desarrollado se llevó a cabo en su aplicación a un caso real de ordenación de la secuencia de cosechas y reforestación en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* pertenecientes a la Reserva Nacional Lago Peñuelas. La implementación comprendió las siguientes etapas para solucionar el problema de ingeniería:

- **Recolección de información:** se analizó la información primaria y secundaria disponible, con el efecto de establecer un marco de referencia para las metas, restricciones y limitaciones de los planes de ordenación alternativos a proponer.
- **Definición del problema:** se determinaron los parámetros, objetivos y restricciones que conformaron a cada plan de ordenación alternativo, los cuales se basaron en las combinaciones de metas de los tomadores de decisiones, imposiciones del medio externo y restricciones presentes en la asignación de recursos. Para esto, fue necesario especificar los elementos de la ordenación forestal, en cuanto a la clasificación de la superficie del patrimonio a ordenar, la silvicultura aplicada a plantaciones de eucalipto y a la estimación de los rendimientos volumétricos de la formación forestal sujeta al estudio, obteniendo así los parámetros dasométricos de las unidades a ordenar. También, se establecieron parámetros económicos y de planificación de cada plan de ordenación alternativo a considerar, donde la combinación de todos los niveles configuraron a 48 planes diferentes. Todos los parámetros dasométricos y de los planes de ordenación alternativos fueron ingresados al módulo Ingreso de Datos de MELISOFT 1.0.
- **Formulación y resolución del problema:** efectuados los dos puntos anteriores, se ejecutó el módulo de Generar Modelo de MELISOFT 1.0, para la formulación, resolución y evaluación automática del modelo MELI de cada plan de ordenación alternativo.
- **Presentación de la solución:** resueltos los modelos de programación lineal, se utilizó el módulo Reportes de MELISOFT 1.0 para disponer, de forma rápida y automática,

de los reportes de información que contienen la solución de cada plan de ordenación alternativo, refiriéndose: al programa de cosechas y raleos; a la proyección de los indicadores de volumen, valor presente neto, valor potencial de suelo y valor total del patrimonio a lo largo del horizonte de planificación de cada plan según sea la calidad del sitio y la estructura de la masa forestal; la proyección de las existencias volumétricas del patrimonio; la distribución de la superficie por clase de edad del bosque al término del período de conversión. Los reportes se visualizan en pantalla a través de la aplicación diseñada.

- Evaluación de planes: cada plan de ordenación alternativo fue evaluado en términos financieros para el período de conversión y post-conversión, utilizando como indicador el valor presente neto (VPN) y la actualización del valor potencial del suelo (VPS) desde la segunda rotación en adelante, respectivamente. MELISOFT 1.0 realiza automáticamente la evaluación financiera de los planes.
- Comparación de planes: se calculó el valor presente total del patrimonio (suelo y suelo) a cada plan de ordenación alternativo, el cual es definido como a la suma de los indicadores VPN más la actualización del VPS. También se estimó la superficie patrimonial no regulada por superficie al término del período de conversión. Se interpretaron los reportes de “Evaluación y Comparación de Planes – Indicadores y Regulación del Patrimonio” y “Evaluación y Comparación de Planes – Indicadores por Cosecha y Raleo” de MELISOFT 1.0.
- Selección del mejor plan: el criterio de selección del mejor plan de ordenación fue aquel que cumplió con el objetivo estratégico y las restricciones impuestas por la organización, es decir, el que maximizó el valor presente total del patrimonio y minimizó la superficie no regulada al término del período de conversión. Se determinó que el análisis de la 10 mejores alternativas permite decidir satisfactoriamente la mejor opción.

El software MELISOFT 1.0 automatizó totalmente desde la fase “Formulación y resolución del problema” hasta “Comparación de planes”. En la fase “Selección del mejor plan” la automatización fue parcial, ya que la aplicación proveyó de información para que el autor

decidiera, en base a su criterio técnico, el mejor plan de ordenación alternativo. Las salidas del software se encuentran en el material acompañante digital de la presente memoria (Apéndice III).

Por último, se analizaron los efectos del plan de ordenación óptimo sobre el patrimonio, bajo los siguientes tópicos: Dinámica de la existencia volumétrica y del aprovechamiento productivo propuesto por el plan, relativo a la superficie y el volumen, sobre la estructura de la masa forestal y la calidad del sitio; Regulación por superficie del patrimonio al término del período de conversión y su implicancia en la producción maderera de la segunda rotación del período de post-conversión; Fragmentación del patrimonio durante el período de conversión. Los programas computacionales para realizar el procesamiento de datos fueron: MELISOFT 1.0 y Microsoft Excel 2003; para la confección de figuras concernientes a gráficos se utilizó SigmaPlot 10.0.

6. RESULTADOS

6.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SOFTWARE

6.1.1. Ingeniería y Modelado del Sistema de Información

6.1.1.1 *Visión Global del Sistema*

La descripción del ámbito general del sistema requiere comprender el concepto de Manejo Forestal Sustentable, el cual interrelaciona cuatro etapas principales o subconjuntos, cada uno con objetivos y restricciones propios. El desarrollo, coordinación y control entre las fases, permitirá al ente planificador y gestor del bosque aumentar la eficiencia y eficacia en la búsqueda del objetivo principal del Manejo Forestal Sustentable, es decir, lograr un compromiso en el espacio económico, social y ambiental, en la utilización de los recursos disponibles (Figura 2).

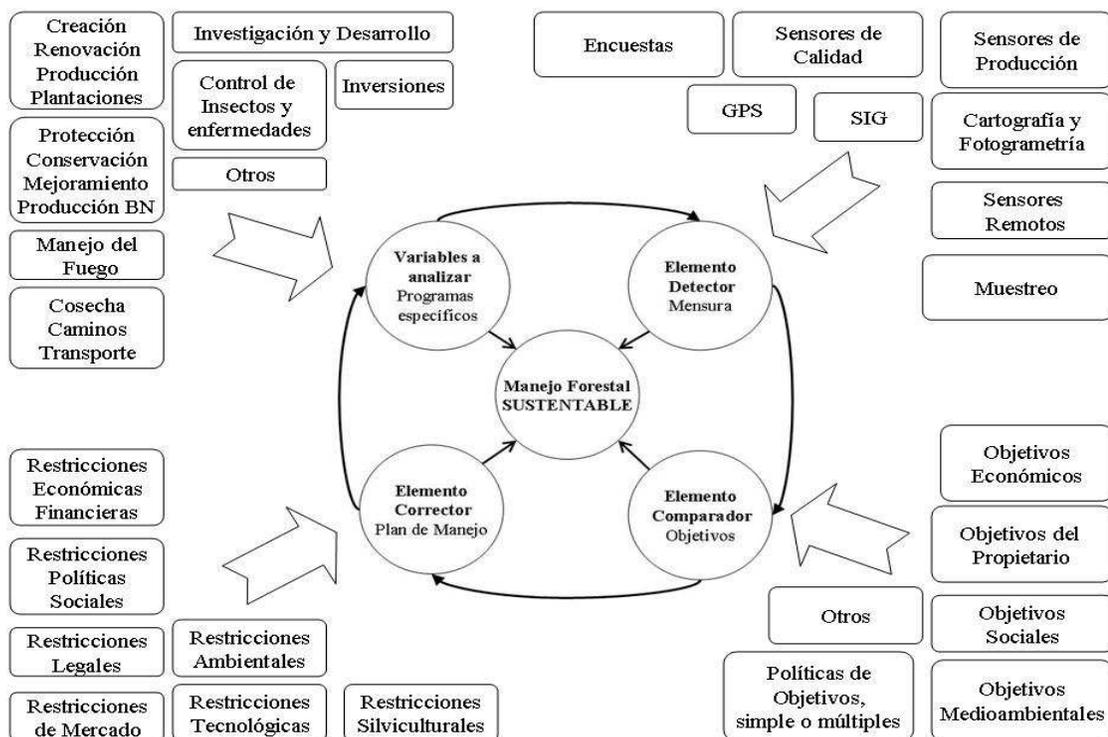


Figura 2. Proceso de desarrollo, coordinación y control en el Manejo Sustentable de bosques prediales o multiprediales, en todos los niveles de la planificación forestal, es decir, operativo, táctico y estratégico.

Fuente. Gilchrist, 2006.

La Ordenación Forestal integra variados elementos y actividades que componen las etapas del Manejo Forestal Sustentable. Especificando aún más, la determinación de la secuencia óptima de intervenciones silvícolas, bajo diversos objetivos y restricciones, afecta directamente a las organizaciones y/o entidades que gestionan el bosque, y que deben asignar eficientemente los recursos tangibles (físicos y financieros), intangibles (reputación, tecnología y cultura) y humanos (conocimiento, comunicación y motivación) que estén disponibles para tales efectos.

6.1.1.2 *Dominio del Sistema*

La aplicación tradicional de modelos matemáticos de planificación territorial, basados en programación lineal, para la búsqueda de soluciones óptimas en problemas de Ordenación Forestal, puede explicarse como:

- I. El planificador de un patrimonio forestal formula el problema matemático en formato de programación lineal. El modelo es parametrizado en función de la información disponible y a las metas y restricciones que la organización estime conveniente imponer.
- II. El planificador resuelve el problema utilizando algún software de optimización lineal (solver).
- III. Por último, el planificador analiza la solución del programa lineal bajo distintas perspectivas, y decide si es necesario reformular el problema inicial o utilizar la información de salida.

Dada la complejidad y envergadura de algunos modelos matemáticos, la etapa de formulación del problema y análisis de la solución puede convertirse en una tarea extremadamente difícil, hecho que permite indagar sobre la proporcionalidad directa que existe entre la complejidad del problema y el tiempo a destinar para la realización de actividades que permitan solucionarlo.

La figura 3 muestra un modelo conceptual del dominio del sistema, en el cual la función principal está descompuesta jerárquicamente en funciones de: recolección de información,

definición del problema, formulación y resolución del problema, presentación de la solución, evaluación de planes, comparación de planes, selección del mejor plan (en el acápite 5.2.2. se define detalladamente cada función).

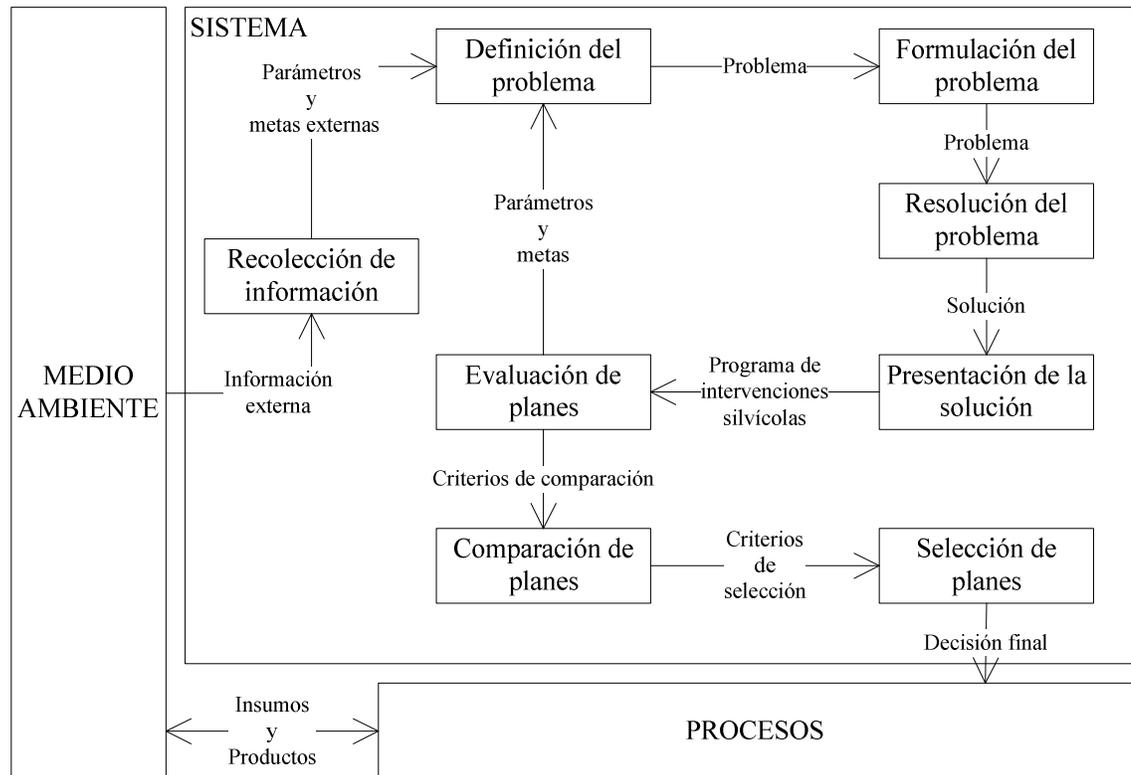


Figura 3. Modelo conceptual del dominio de un sistema de información, desglosado en funciones, que permite solucionar problemas de planificación forestal.

Según la forma en que el planificador forestal toma las decisiones y la cantidad de información que necesita para ello, las funciones del sistema se clasifican en no estructuradas, semiestructuradas y estructuradas. Las funciones no estructuradas son aquellas que no cuentan con un procedimiento rutinario para llevarlo a cabo, es decir, el planificador toma la decisión en base a criterios, indicadores y puntos de vista sobre el problema solucionar, es así que las funciones, definición del problema y selección del mejor plan corresponden a este tipo. La función recolección de información corresponde a una función semiestructurada, ya que integra dos procesos, una de detección (por ejemplo, investigación documental) y otra de registro de la información relevante, en un medio idóneo, que sustente la función de definición del problema. Por último, las funciones formulación y resolución del problema, presentación de la solución, evaluación y

comparación de planes se posicionan en la región de las funciones estructuradas, para ellas existen procedimientos definidos para ejecutarlos. En consecuencia, no todas las funciones pertenecientes al sistema son susceptibles de automatizar en computadores, siguiendo reglas y/o procedimiento, por esta razón se ha definido que: las funciones no estructuradas no tienen aptitud para la automatización; las funciones semiestructuradas pueden automatizarse parcialmente; y las funciones estructuradas pueden automatizarse totalmente.

6.1.1.3 *Elementos del Sistema*

El sistema de información comprende un conjunto de elementos organizados, cuya disposición permite el cumplimiento del objetivo principal, es decir, la ordenación de un patrimonio forestal, el cual es un problema de ingeniería abordado a través de técnicas de planificación. En consecuencia, los elementos del sistema están dispuestos en cada fase de la planificación forestal.

Software

Son programas de computadoras, estructuras de datos y documentación que son utilizados para cumplir una tarea específica, ya sea un método lógico, procedimiento o control que sea necesario, pudiendo representar una función estructurada o no. El cuadro 4 muestra algunos software básicos que son utilizados típicamente en las diversas etapas de la planificación forestal, es importante destacar que esta lista no es excluyente de otros programas computacionales que están en expansión, tales como los de código abierto u *open source*, los cuales últimamente han acaparado gran atención y preferencia por parte de los usuarios, ya que éstos pueden: distribuirse libremente, permiten estudiar el código y mejorar la aplicación y por último, en su mayoría son gratuitos.

Cuadro 4. Ejemplos de software utilizados en algunas actividades de la Planificación Forestal.

| Etapa de Planificación | Actividad | Función del Software | Ejemplos |
|--|--|--|---|
| Recolección de datos y preparación de la información | Topografía y cartografía | Aerofotogrametría, cartografía y SIG | ARGIS, Mapinfo, IDRISI |
| | Sistemas de Inventario | Análisis Estadístico, gestión de base de datos, sistema de posicionamiento global. | SPSS, R Gui, ACCESS, EXCEL, GPS Garmin |
| | Organización del Patrimonio | Aerofotogrametría, cartografía y SIG | ARGIS, Mapinfo, IDRISI |
| | Crecimiento y rendimiento de formaciones | Muestreo forestal, análisis de tallo, simuladores de crecimiento forestal | DielmoOpenLIDAR, R Gui, Simulador Insigne y Eucasim |
| | Investigación Documental | Internet y bibliotecas electrónicas | Browser Mozilla Firefox, Explorer, Opera. |
| Definición del problema | Investigación Documental | Internet y bibliotecas electrónicas | Browser Mozilla Firefox, Explorer, Opera. |
| Formulación y resolución del problema | Modelos Matemáticos | Confeción y resolución de modelos de programación lineal | CPLEX, LPSOLVE, LINDO, LINGO, JLP |
| Evaluación, comparación y selección de planes | Obtención de reportes para apoyo a la toma de decisiones | Gestión de bases de datos y mallas de cálculo | EXCEL, ACCESS, OPEN OFFICE |

Hardware

Se definen como dispositivos electrónicos que proporcionan capacidad de cálculo, dispositivos de interconexión y dispositivos electromecánicos. En la planificación forestal estos dispositivos se utilizan en todo el espectro de actividades, por nombrar algunos se tiene: sensores remotos, navegadores GPS, notebook, instrumentos electrónicos de medición forestal, entre otros.

Personas

Corresponde a los usuarios y operadores del hardware y software especificado con anterioridad. Dentro del sistema analizado, el Ingeniero Forestal es el planificador. Él utiliza una diversidad de equipamientos y programas computacionales que facilitan la ordenación forestal.

Documentación

La documentación básica que es necesaria para la ordenación forestal son: planes de ordenación anteriores, manuales técnicos de operaciones silvícolas, manuales técnicos de caminos y transporte forestal, documentos del marco legal y administrativo de la ordenación forestal, documentación científica del estado del arte en ordenación y silvicultura, entre otros. Cada fase de la planificación requiere de manuales, formularios u otra información de carácter descriptivo que especifiquen aspectos generales y/o particulares de la ordenación forestal.

Procedimientos

El planificador forestal utiliza el software, hardware y la documentación disponible en el sistema para proceder a tomar una decisión sobre el problema de ordenación forestal. Generalmente, el proceso consta en el flujo de información, entrada y salida, entre el medio ambiente, las funciones del sistema y los procesos externos a él (Figura 3).

6.1.2. Análisis de requisitos del software

6.1.2.1 *Interfaz del usuario*

- 1) El usuario se comunicará con el computador personal a través de una interfaz gráfica interactiva. En consecuencia, se facilitará el intercambio de información entre las entidades hombre – máquina, por medio del uso de ventanas, señalizaciones y controles de elección en la mayoría de los procesos implícitos de MELISOFT.
- 2) Los dispositivos externos, del hardware, para ingresar información al sistema serán el teclado y el ratón.
- 3) Los dispositivos internos, del software, serán formularios compuestos por controles de base de datos, cajas de texto simples y combinadas, grillas de datos, botones y barras deslizantes.

6.1.2.2 *Datos de entrada*

- 1) El usuario podrá ingresar y/o modificar los datos de entrada referentes a los planes de ordenación alternativos, al patrimonio actual a planificar y a los rendimientos volumétricos del bosque ubicado en el patrimonio. A continuación, se detalla cada requisito:
 - a) Planes de ordenación alternativos: Un plan de ordenación alternativo queda definido si son especificados los datos generales, parámetros financieros y de planificación de él. Estos datos son utilizados en la identificación de cada plan de ordenación alternativo y para la formulación del modelo de programación lineal MELI asociado a cada uno de ellos.
 - i) Datos Generales: corresponde a los datos que identifican y diferencian un plan de otro, sus elementos son número identificador del plan, nombre del plan y el estado (disponible o no disponible).
 - ii) Parámetros financieros: son los datos que permiten estimar los coeficientes financieros de la función objetivo y las restricciones de flujo del modelo MELI que así lo requieran. Los datos son: precio de producto (miles\$/m³ ssc), costo de reforestación (miles\$/ha), gastos generales (miles\$/ha/año) y tasa de descuento (%).
 - iii) Parámetros de planificación: los datos configuran la formulación del modelo MELI de cada plan de ordenación alternativo. Estos se detallan como: variables de decisión (cosechas o cosechas y raleos), función objetivo (maximización del volumen, maximización del valor presente neto, maximización del valor potencial del suelo o maximización del valor presente total del patrimonio), tipo de regulación de flujo (regulación de volumen, regulación de valor presente neto, regulación de valor potencial del suelo, regulación de valor presente total del patrimonio o rendimiento libre), tasa de regulación (0-200%, con variaciones en decenas), horizonte de planificación (años), edad mínima de intervención (años), ciclo de corta (años).

- b) Patrimonio actual a planificar: Corresponde a los datos de las especies, sitios y rodales que existen en el patrimonio a ordenar.
 - i) Especies: reúne los datos de número identificador de la especie, nombre de la especie y descripción de la especie.
 - ii) Sitios: incorpora los datos concernientes al número identificador del sitio, la especie que se asocia al sitio y la descripción del sitio.
 - iii) Rodales: incluye los datos generales del rodal, tales como número identificador del rodal, nombre del rodal y estado del rodal (disponible o no disponible). También, contiene los parámetros dasométricos del rodal, tales como: sitio, estructura de la masa forestal, edad actual (años) y superficie (ha).
- c) Rendimientos volumétricos del bosque: Se almacenan los datos de rendimientos volumétricos anuales por hectárea para cada rodal (bosque viejo) y sitio (bosque nuevo)³.
 - i) Rendimiento de rodales (bosque viejo). son los datos de volumen anual (m^3_{ssc}/ha) por concepto de cosecha y raleo de cada rodal, desde el año uno hasta el año 100.
 - ii) Rendimiento de sitios (bosque nuevo): son los datos de volumen anual (m^3_{ssc}/ha) por concepto de cosecha y raleo de cada sitio, desde el año uno hasta el año 100.
- 2) El software permitirá ingresar los datos de rendimientos volumétricos de rodales y sitios.
- 3) El software mostrará gráficamente, en pantalla, los datos ingresados y/o modificados en forma ordenada, a través de grillas y gráficos de datos.

³ Para más detalle, revisar formulación general de MELI en Apéndice I.

6.1.2.3 *Información de salida*

- 1) El usuario obtendrá como información de salida del proceso de transformación de datos de MELISOFT: modelos de programación lineal, soluciones óptimas de los modelos resueltos con el solver y reportes de información con interpretación forestal.
 - a) Modelos de programación lineal MELI: cada plan de ordenación alternativo tienen asociado un modelo de programación lineal MELI. El formato de los modelos consta de una función objetivo sujeta a restricciones, además contiene comentarios sobre los datos de entrada de los planes de ordenación que configuran y parametrizan cada modelo.
 - b) Solución óptima entregada por solver: el modelo de programación lineal de cada plan de ordenación alternativo será resuelto con el solver de optimización LPSOLVE 5.5, del cual se obtendrá la solución óptima de cada problema, es decir, la estimación del valor primal de cada variable de decisión del modelo. La solución óptima no tiene interpretación forestal, pero los datos constituirán la base para la confección de reportes específicos con significado e interpretación forestal.
 - c) Reportes de datos: el diseño de los reportes propenden a facilitar la interpretación y comparación de los resultados obtenidos de la resolución de los modelos de optimización MELI. Los reportes contendrán información específica de cada plan de ordenación alternativo, y se desglosan como:
 - i) Programa anual de cosechas y raleos: especificará la superficie (ha) y volumen (m^3 ssc) a aprovechar por intervenciones anuales de cosecha y raleo de los rodales. Cada rodal será identificado por su número identificador, calidad del sitio, estructura y edad de plantación. La información del programa podrá ordenarse en plan-año-rodales o plan-rodal-años.
 - ii) Evaluación y comparación de planes: mostrará la evaluación por intervenciones de cosecha, raleo y total de los indicadores de volumen (m^3 ssc), valor presente neto (miles \$), valor potencial del suelo (miles \$) y valor presente total del patrimonio (miles \$) de todos los planes de ordenación alternativos

considerados. También expresará las estadísticas de máximo, mínimo, promedio y desviación estándar del indicador valor presente total del patrimonio (miles \$), resaltando el o los planes alternativos que obtienen el valor máximo.

- iii) Flujo anual de indicadores por plan: mostrará la evaluación anual, hasta el final del horizonte de planificación, de los indicadores de volumen (m^3 ssc), valor presente neto (miles \$), valor potencial del suelo (miles \$) y valor presente total del patrimonio (miles \$) de cada plan de ordenación alternativo.
- iv) Superficie – indicador – estructura por plan: detallará la superficie (ha), valor del indicador (m^3 ssc o miles \$) y totales a aprovechar anualmente por intervenciones de cosecha y raleo, en rodales con estructura de la masa de monte alto o monte bajo, de cada plan de ordenación alternativo considerado.
- v) Superficie por edad del bosque al final del horizonte de planificación: permitirá verificar si el patrimonio forestal quedará regulado por superficie al final del horizonte de planificación por cada plan de ordenación alternativo, es decir, deberán estar representadas todas las edades del bosque, desde el año uno hasta el final del horizonte de planificación, en superficies iguales.
- vi) Proyección de existencias por plan: mostrará las existencias volumétricas anuales (m^3 ssc) del patrimonio durante el horizonte de planificación de cada plan de ordenación alternativo.

6.1.2.4 *Procesos de transformación*

- 1) El sistema MELISOFT resolverá automáticamente un problema de ordenación forestal siguiendo los pasos lógicos:
 - a) Ingreso al sistema de todos los datos básicos de planes de ordenación alternativos, patrimonio actual a planificar y rendimiento volumétrico de los bosques.
 - b) Formulación del problema en formato de programación lineal del software LINDO, cuya sintaxis, basado en un lenguaje algebraico natural, reconoce nueve reglas básicas:

- i) La función objetivo debe declararse anteponiendo el comando MAX o MIN.
 - ii) El nombre de cada variable de decisión está limitado a ocho caracteres.
 - iii) El nombre de cada restricción debe finalizar con un paréntesis.
 - iv) Se reconocen cinco operadores aritméticos y lógicos (+, -, <, >, =).
 - v) El orden de precedencia de las operaciones es de izquierda a derecha.
 - vi) Posibilidad de añadir comentarios al modelo anteponiendo un signo de exclamación a éste.
 - vii) La función objetivo y las restricciones pueden dividirse en varias líneas o combinarlos en una sola.
 - viii) No existen diferencias entre letras mayúsculas o minúsculas en la formulación del modelo.
 - ix) El lado derecho de la restricción acepta sólo constantes y, el lado izquierdo de la restricción acepta sólo a las variables de decisión y sus coeficientes.
- c) Resolución de los modelos de programación lineal con el solver LPSOLVE 5.5.
 - d) Evaluación de resultados por cada plan de ordenación.
 - e) Generación de reportes con interpretación forestal
- 2) El modelo matemático que utilizará el software para la formulación de cada plan de ordenación alternativo será el modelo estratégico lineal o MELI, cuya formulación general y supuestos se encuentra en el Apéndice I del presente documento.
- 3) El sistema interactuará con otros programas computacionales para realizar transformaciones complejas de datos, tales como:
- a) Solver de modelos lineales de optimización LPSOLVE 5.5.
 - b) Visor Snapshot Viewer 11.0 de reportes de Microsoft Access 2003.

6.1.2.5 *Almacenamiento de datos*

- 1) El sistema almacenará todos los datos ingresados por el usuario y los transformados por MELISOFT en un archivo de base de datos Microsoft Access 2003.
- 2) El sistema almacenará la formulación y la solución de cada modelo de programación lineal MELI en archivos con formato de texto plano.
- 3) El sistema almacenará los reportes de datos de cada modelo de programación lineal MELI en un archivo con formato Snapshot Viewer 11.0.

6.1.2.6 *Rendimientos*

No se requieren detalles específicos de rendimientos exigidos al sistema, ya que éste es una aplicación informática pequeña, orientada a la planificación de bosques coetáneos, que no utiliza intensamente los recursos del hardware del computador personal.

6.1.2.7 *Restricciones de desarrollo*

Dada la interacción del sistema con otros programas computacionales, será necesario homogenizar los procesos y el tratamiento de datos en todos ellos. En consecuencia, para que el sistema sea funcional para el usuario, se han de establecer las siguientes situaciones:

- 1) El sistema operativo a utilizar será Windows XP.
- 2) El gestor de base de datos será Microsoft Access 2003.
- 3) La configuración regional del computador personal deberá establecer para los números que: el símbolo decimal sea “.” y el símbolo de separación de miles sea “,”.

6.1.3. Diseño del Software

6.1.3.1 *Estructura de Datos*

El sistema cuenta con dos tipos de estructura de datos, el primero basado en un modelo relacional y el segundo establecido en un modelo jerárquico.

El modelo relacional de base de datos, se creo utilizando el software gestor de base de datos Microsoft Access 2003, y es representado por medio del archivo “Datos.mdb” de la aplicación diseñada. Los objetos de datos que la integran son:

- Tablas de datos, en total 19, cuyas propiedades están especificadas por sus atributos (campos).
- Consultas de selección a la base de datos, en total siete, realizadas con el lenguaje estructurado de consultas (SQL).
- Reportes de información, en total 15, obtenidos de la selección de datos a través de consultas a la base de datos.

El modelo jerárquico de datos es representado por los archivos generados o importados por el software diseñado. Los objetos de datos que la integran son:

- Archivo de texto plano denominados <Nombre del Plan>.txt, registra el modelo de programación lineal MELI para cada plan de ordenación alternativo. Por lo tanto, existen tantos objetos de datos como planes a considerar. Se ubican en la carpeta “\TXTModelos\” del directorio de la aplicación diseñada.
- Archivo de texto plano denominados SOL_LP_<Nombre del Plan>.txt, registra la solución de un modelo de programación lineal MELI resuelto con el solver LPSOLVE 5.5. Por lo tanto, existen tantos objetos de datos como planes de ordenación factibles a considerar. Se ubican en la carpeta “\SalidaLPSOLVE\” del directorio de la aplicación diseñada.
- Archivos en formato Snapshot (*.snp), en total 15, donde están almacenadas las vistas de los reportes creados en el software gestor de base de datos Microsoft Access 2003.

Tipos de objetos de datos

Los objetos de datos descritos a continuación están clasificados según la función que cumplen, diferenciándose en: datos de entrada, datos de proceso, datos de salida, datos de

consulta y datos de reporte. Para más detalles referirse al diccionario de datos del software MELISOFT ubicado en el material acompañante digital de la presente memoria (Apéndice III).

1) Objetos de datos de entrada: Agrupan a todos los datos necesarios para que el sistema inicie la operación de transformación. En su totalidad, estos objetos pertenecen al modelo relacional y se denotan como:

- 01_PM: Tabla que registra los datos concernientes a los parámetros de planificación de cada plan de ordenación alternativo a considerar en el sistema.
- 02_DP: Tabla que registra los datos concernientes a los rodales que conforman el patrimonio a planificar.
- 03_RBV: Tabla que registra los datos concernientes a la estimación del comportamiento del bosque, en cuanto a los rendimientos anuales en volumen, valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS) y valor presente total del patrimonio (VPT), por concepto de cosecha y raleo de cada rodal del patrimonio a planificar.
- 04_RBN: Tabla que registra los datos concernientes a la estimación del comportamiento del bosque, en cuanto a los rendimientos anuales en volumen, valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS) y valor presente total del patrimonio (VPT), por concepto de cosecha y raleo de cada sitio forestal presente en el patrimonio a planificar.
- 05_VD: Tabla que registra los datos concernientes al tipo de variable de decisión, con el cual se formularán los modelos de programación lineal (MELI), de cada plan de ordenación alternativo.
- 06_FUNO: Tabla que registra los datos concernientes al tipo de función objetivo con el cual se formularán los modelos de programación lineal (MELI) de cada plan de ordenación alternativo.

- 07_SIT: Tabla que registra los datos concernientes a los sitios forestales en los cuales se ubican los rodales del patrimonio a planificar.
- 08_STRC: Tabla que registra los datos concernientes a los tipos de estructura de la masa forestal que poseen los rodales del patrimonio a planificar.
- 09_SP: Tabla que registra los datos concernientes a las especies forestales que están presentes en los rodales del patrimonio a planificar.
- 10_TREG: Tabla que registra los datos concernientes al tipo de regulación de flujo que MELI utilizará.

2) Objetos de datos de proceso: El primer grupo de objetos de datos de proceso están estructurados bajo el modelo relacional. Estos surgen de la transformación de los objetos de datos de entrada y alimentan de datos a objetos de proceso, de salida, de consulta y de reportes. Registran los datos referentes a las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones del modelo de programación lineal MELI, de cada plan de ordenación alternativo. Estos son:

- 001_MODELO: Tabla que registra los datos concernientes a las variables de decisión de MELI por cada iteración del software MELISOFT.
- 11_FUNXPLAN: Tabla que registra los datos concernientes a las funciones objetivos de MELI.
- 12_RESTBV: Tabla que registra los datos concernientes a las restricciones de Bosque Viejo de MELI.
- 13_SUPMAXCOS: Tabla que registra los datos concernientes a las restricciones de superficie disponible para cosechas de MELI.
- 14_SUPMAXRAL: Tabla que registra los datos concernientes a las restricciones de superficie disponible para raleos de MELI.

- 15_REGVOL: Tabla que registra los datos concernientes a las restricciones de regulación de flujo de MELI.
- 16_RESTBN: Tabla que registra los datos concernientes a las restricciones de bosque nuevo de MELI por cada iteración del software MELISOFT.
- 16_RESTBN_FINAL: Tabla que registra los datos concernientes a las restricciones de bosque nuevo de MELI para todas las iteraciones del software MELISOFT.

El segundo grupo de objetos de datos de proceso están estructurados bajo el modelo jerarquizado, tienen como función registrar los datos de entrada del proceso de resolución del modelo de programación lineal MELI de cada plan de ordenación alternativo. Estos son:

- Archivo de texto <Nombre del Plan>.txt: Registra el modelo de programación lineal MELI en formato LINDO, que será resuelto con el solver LPSOLVE 5.5, de cada plan de ordenación alternativo. Está constituido por la maximización de una función objetivo sujeto a las restricciones que el planificador imponga. Existen tanto objetos de datos como planes a procesar.

3) Objetos de datos de salida: La función de este tipo de objeto, consiste en registrar todos los datos de salida que resulten del proceso de resolución del modelo matemático. Consta de dos elementos, los cuales son:

- Un archivo de texto plano, denominado SOL_LP_<Nombre del Plan>.txt, el cual registra la solución de un modelo de programación lineal MELI resuelto con el solver LPSOLVE 5.5. Contiene el valor primal de las variables de decisión. Existen tanto objetos de datos como planes de ordenación factibles a procesar.
- 002_MODELO: Tabla que registra los datos concernientes a las variables de decisión de MELI para todas las iteraciones del software MELISOFT, enriquecido con los datos pertenecientes al archivo SOL_LP_<Nombre del Plan>.txt.

La tabla de datos 002_MODELO, objeto estructurado bajo el modelo relacional, es la base fundamental para la generación de objetos de consulta de selección de datos.

4) **Objetos de Datos de Consulta:** Son objetos de datos estructurados bajo el modelo relacional, que surgen de la consulta de selección en lenguaje estructurado (SQL) sobre los objetos de datos de entrada y salida. Estas tablas de consultas son la base para generar los reportes de MELISOFT. Se denotan como:

- 001_Total Planes (001_Informe): Consulta que registra los datos concernientes al volumen, valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS) y valor presente total del patrimonio (VPT) por concepto de cosechas, raleos y total, de cada Plan de Ordenación alternativo.
- 002_Total Planes x Año (002_Informe): Consulta que registra los datos concernientes al volumen, valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS) y valor presente total del patrimonio (VPT) por concepto de cosechas, raleos y total, por año de la rotación, de cada plan de ordenación alternativo.
- 003_Planes Sup-Vol-Estructura(003-006_Informe): Consulta que registra los datos concernientes al volumen, valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS), valor presente total del patrimonio (VPT) y superficie a intervenir por concepto de cosechas, raleos y total, por año de la rotación y tipo de estructura de la masa forestal, de cada plan de ordenación alternativo.
- 004_Bosques al Final del Horizonte (007_Informe): Consulta que registra los datos concernientes a las existencias en superficie, por clase de edad del bosque, al final de la rotación de cada plan de ordenación alternativo.
- 005_Programa de Cosecha y Raleo (008_Informe): Consulta que registra los datos concernientes al volumen y superficie a intervenir por concepto de cosechas, raleos y total, por año de la rotación, rodal, sitio forestal y tipo de estructura de la masa forestal, de cada plan de ordenación alternativo.

- 006_Evolución Existencia Volumétrica: Consulta que registra los datos concernientes a las existencias en superficie y volumen, por año de la rotación, de cada plan de ordenación alternativo.
- 007_Intervenciones anuales por Rodal (010_Informe): Consulta que registra los datos concernientes al volumen y superficie a intervenir por concepto de cosechas, raleos y total, por rodal, sitio forestal, tipo de estructura de la masa forestal y año de la rotación, de cada plan de ordenación alternativo.

5) Objetos de Datos de Reportes: Estos objetos de datos están estructurados bajo el modelo jerarquizado. Tienen como función registrar las vistas de los reportes generados por Microsoft Access 2003. Estos son:

- “001_1.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “001_Evaluación y Comparación de Planes Global”.
- “002_2.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “002_Flujo Anual de Indicadores + Gráficos”.
- “003_3.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “003_Planes Sup-Vol-Estructura Datos”.
- “003_4.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “003_Planes Sup-Vol-Estructura Gráficos”.
- “004_5.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “004_Planes Sup-VPN-Estructura Datos”.
- “004_6.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “004_Planes Sup-VPN-Estructura Gráficos”.
- “005_7.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “005_Planes Sup-VPS-Estructura Datos”.

- “005_8.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “005_Planes Sup-VPS-Estructura Gráficos”.
- “006_9.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “006_Planes Sup-VPT-Estructura Datos”.
- “006_10.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “006_Planes Sup-VPT-Estructura Gráficos”.
- “007_11.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “007_Existencias Final Horizonte Datos”.
- “007_12.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “007_Existencias Final Horizonte Gráficos”.
- “008_13.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “008_Programa de Cosecha y Raleo”.
- “009_14.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “009_Evolución Volumétrica de Existencias”.
- “010_15.snp”: Archivo en formato Snapshot que registra las vistas del reporte “010_Intervenciones Anuales por Rodal”.

Relaciones entre los Objetos de Datos

Las relaciones entre los objetos de datos, basados en un modelo relacional, se manifiestan a través de un atributo denominado clave principal, el cual es un número identificador único de cada instancia. En la figura 4, se muestran todas las claves principales y externas que relacionan los objetos de datos con estructura relacional en el software MELISOFT. El color de la tabla indica la función que cumple el objeto.

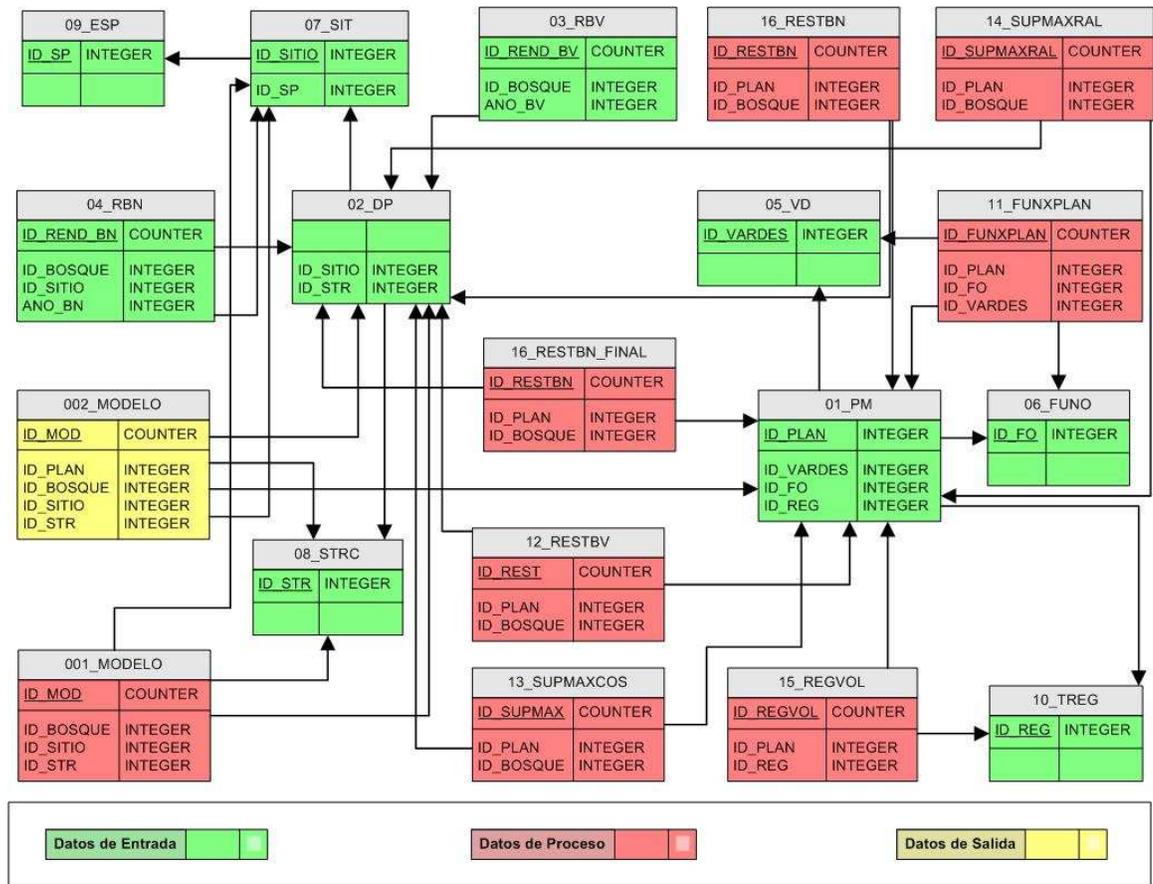


Figura 4. Modelo relacional de los objetos de datos de entrada, proceso y salida del software MELISOFT.

Para asegurar la integridad referencial de las tablas, la relación se activa cuando una clave externa de una tabla (atributo) invoca la clave principal de otra. Por ejemplo, se tienen las tablas 09_ESP, que incluye las especies forestales presentes en el patrimonio, y 07_SIT, que contiene los datos de los sitios forestales presentes en el patrimonio. Entonces, la restricción de la relación es que cada sitio forestal (ID_SITIO) debe estar asociado a una especie (ID_SP) inequívocamente (Figura 4).

Flujo de Información entre los objetos de datos

La representación del flujo de información entre los objetos de datos del sistema se realiza por medio de un diagrama de flujo de datos (DFD). Este proporciona una representación gráfica acerca del movimiento y transformación de la información desde la entrada hasta la salida de un proceso funcional, la representación del software está en distintos niveles de abstracción (Figura 5 y Figura 6).

La figura 5 muestra el modelo fundamental o DFD de nivel 0 del software diseñado (forma circular). La forma rectangular de la izquierda representa a la entidad externa principal que produce información para ser usada por MELISOFT, es decir, el planificador del patrimonio forestal, y la forma rectangular de la derecha simboliza a la entidad externa que consume información generada por MELISOFT, los reportes de ordenación forestal. Las flechas denotan objetos de datos que entran o salen del software. El planificador del patrimonio forestal define parámetros, metas y limitaciones para ingresarlas al sistema. MELISOFT realiza los procesos de transformación de datos y genera la información de salida que alimenta y estructura los reportes de ordenación forestal.

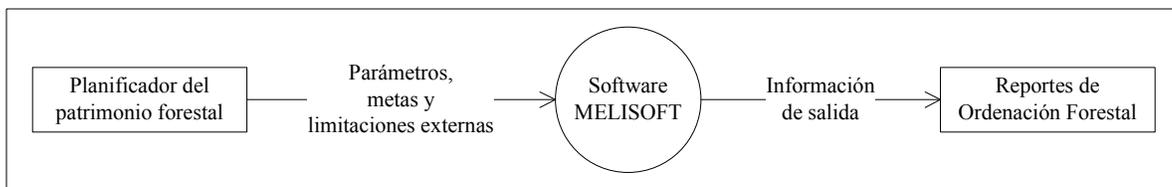


Figura 5. Modelo fundamental del software MELISOFT.

El DFD de nivel 1 (figura 6), detalla el proceso de transformación de la información por el software MELISOFT. El proceso se describe como: El software MELISOFT permite al planificador del patrimonio forestal ingresar los parámetros, metas y limitaciones externas de la gestión forestal; formula, resuelve y evalúa programas lineales de optimización MELI y genera e imprime Reportes de ordenación forestal, los cuales son un apoyo en la toma de decisiones del planificador. Durante todos los procesos de transformación del sistema, menos en impresión de reportes, se almacenan la información en la base de datos “datos.mdb”, además en los procesos específicos de formulación MELI, resolución MELI y generación de reportes se almacenan los datos en archivos con formato de texto plano y Snapshot Viewer (Figura 6).

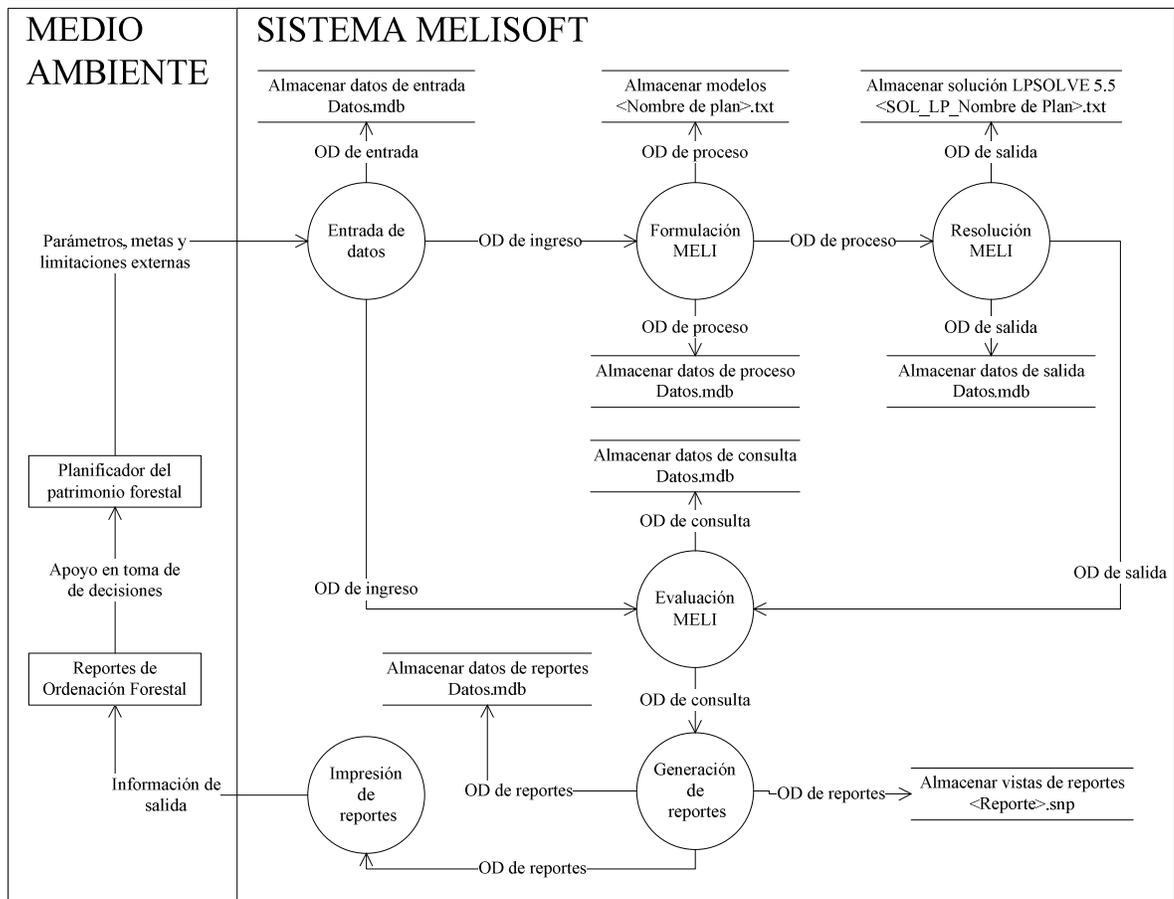


Figura 6. Diagrama de flujo de datos de los objetos de datos que integran MELISOFT.

6.1.3.2 Arquitectura del Software

Posterior al análisis de los requisitos del software y la estructura de los datos, se determina la estructura jerárquica de los componentes o módulos de MELISOFT, base del diseño de la interfaz del usuario y declaración de procedimientos de éste (Figura 7).

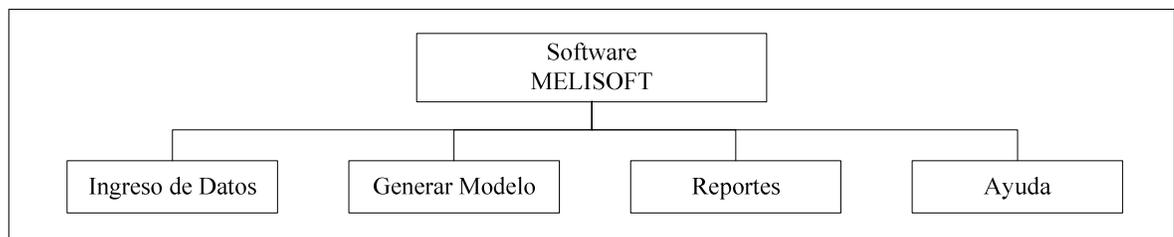


Figura 7. Estructura jerárquica de los componentes del software MELISOFT.

La figura 7, muestra los cuatro módulos generales del software diseñado, declarándose como: “Ingreso de Datos”, “Generar Modelo”, “Reportes” y “Ayuda”. El módulo “Ingreso de Datos” contiene a otros módulos subordinados a él, siendo estos: “Planes de Manejo”,

“Patrimonio actual” y “Rendimientos”. La función de este componente es almacenar y/o modificar los datos concernientes a los planes de ordenación a considerar por el planificador, al patrimonio actual a planificar y a los rendimientos volumétricos de los rodales y sitios presentes en el patrimonio a planificar (Figura 8).

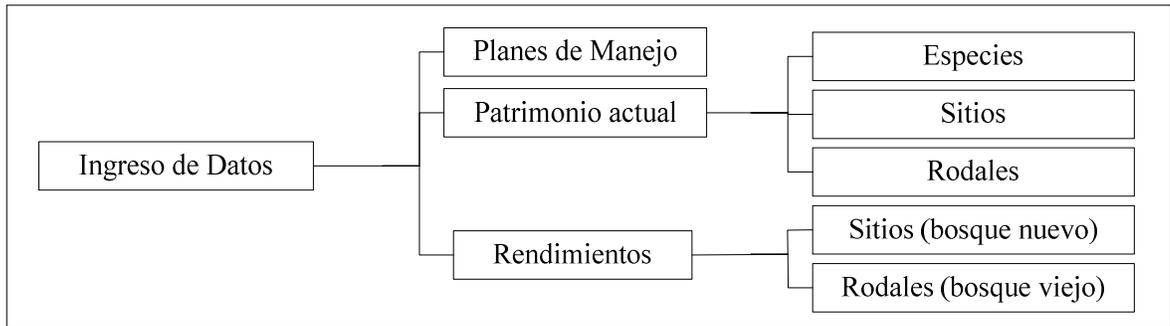


Figura 8. Estructura jerárquica de los componentes subordinados al módulo “Ingreso de Datos” del software MELISOFT.

Los módulos “Generar Modelo” y “Ayuda” no contienen a otros subordinados a él. La función del primero es formular, resolver y evaluar el modelo de optimización de cada plan de ordenación alternativo a considerar. La función del módulo “Ayuda” es ofrecer información de ayuda al usuario con respecto a los procesos y funciones implícitas de MELISOFT (Figura 7).

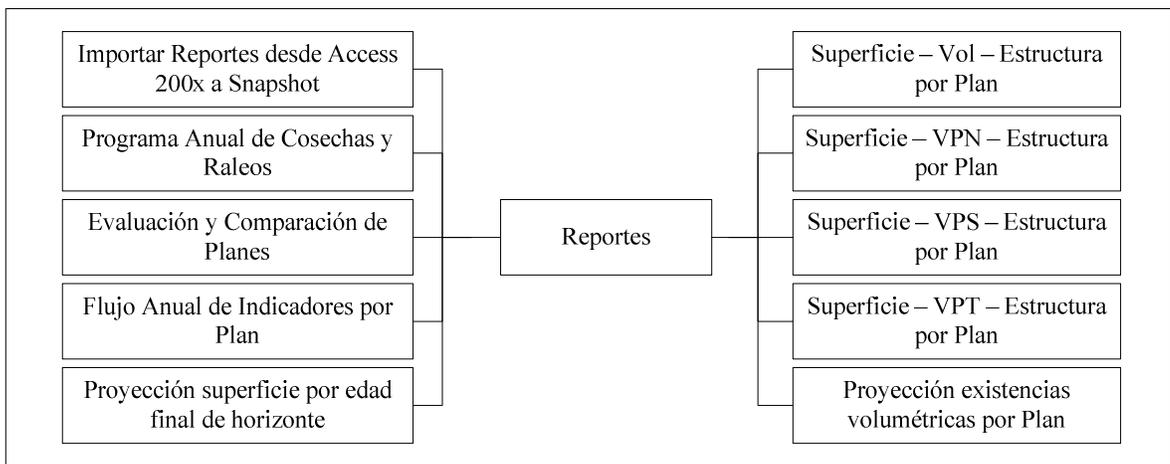


Figura 9. Estructura jerárquica de los componentes subordinados al módulo “Reportes” del software MELISOFT.

El módulo “Reportes” cuenta con múltiples componentes encadenados a su estructura, los cuales son reportes con interpretación forestal. La función principal de este módulo es de

importar los reportes del archivo “datos.mdb”, que está en formato Microsoft Access 2003, y mostrarlos en el visor Snapshot Viewer de la aplicación (Figura 9).

Tal cual se observa en la figura 7, figura 8 y figura 9, el diseño modular del software responde a las necesidades del usuario (requerimientos) y a la posibilidad de agregar o desagregar funciones según sea la estructura de datos, en cuanto a la identificación de los objetos de datos, sus relaciones y al flujo de información y transformación de éstos.

6.1.3.3 Interfaz gráfica del usuario

La interfaz gráfica del usuario (GUI, *graphics user interfaces*) está basada en ambiente Windows. El usuario accede y se comunica de forma rápida e intuitiva con el computador a través de la representación gráfica de elementos de control integrados en Visual Basic 6.0. En los siguientes acápites se explicarán detalladamente las interfaces diseñadas para cada módulo.

Módulo Ingreso de Datos

La interfaz gráfica del módulo “Ingreso de Datos” consta de varios elementos en el menú contextual e íconos de inicio rápido en la barra de herramientas, los cuales despliegan visualmente las ventanas de ingreso y/o modificación de datos referentes a los planes de manejo, patrimonio actual y rendimientos (Figura 10).

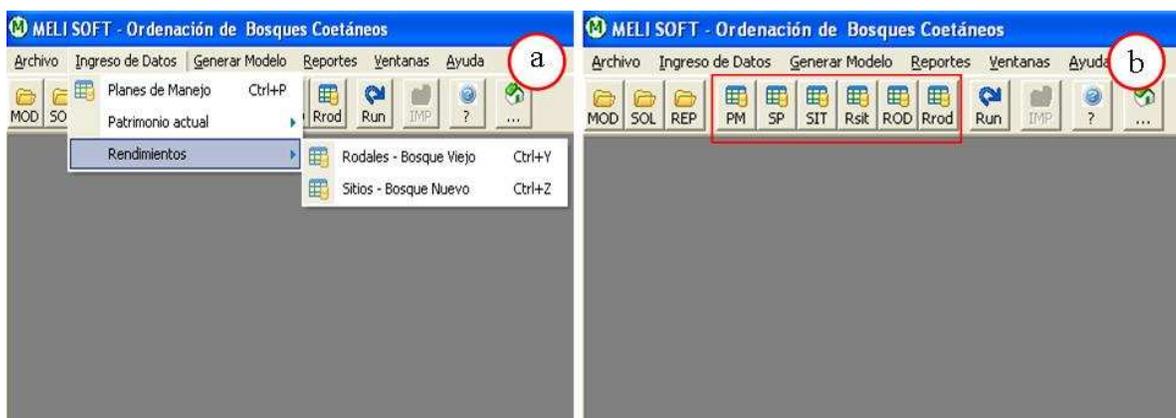


Figura 10. Interfaz gráfica del usuario para los elementos del menú contextual (a) e íconos de inicio rápido de la barra de herramientas (b) del módulo Ingreso de Datos de MELISOFT.

El primer elemento del menú contextual del módulo “Ingreso de Datos” es “Planes de Manejo”, la ventana muestra todas las opciones que caracterizan a cada plan, tanto en los datos generales, parámetros financieros y parámetros de planificación. Los controles visuales utilizados en el diseño de la interfaz son (Figura 11):

- Cajas de texto simple, para guardar datos alfanuméricos, tal como “Nombre del Plan”; y numéricos como los contenidos en los parámetros financieros y algunos de los parámetros de planificación (horizonte de planificación, edad mínima de intervención, tasa de regulación y ciclo de corta) de cada plan. Estos últimos, están enlazados a un control up-down para modificar el valor numérico de los parámetros.
- Caja de texto combinada, para la selección del estado del plan (disponible y no disponible), de las variables de decisión, la función objetivo y el tipo de regulación de cada plan de ordenación alternativo.
- Grilla de datos y botones enlazados por controles de base de datos ADO al archivo “datos.mdb”, que muestra de manera resumida los parámetros de todos los planes contemplados por el planificador.

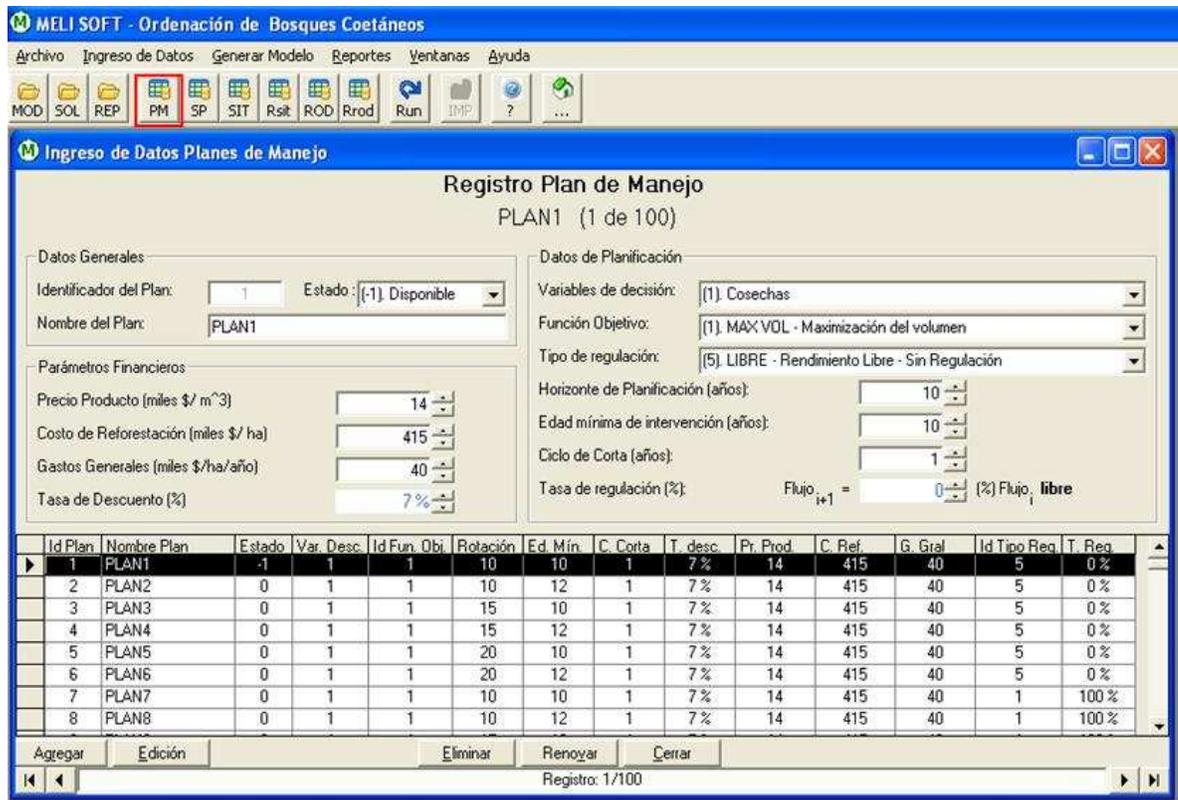


Figura 11. Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ingreso de Datos de Planes de Manejo de MELISOFT.

En la figura 12 puede observarse la interfaz diseñada para el ingreso y/o modificación de datos de los módulos “Especies”, “Sitios” y “Rodales”. Cada ventana contiene controles de:

- Cajas de texto simple, para guardar datos alfanuméricos, tales como “Nombre de la Especie”, “Descripción de la Especie”, “Descripción del Sitio”, “Nombre del Rodal”; y numéricos como “Identificador Especie”, “Identificador Sitio”, “Identificador Rodal”. Los datos numéricos de “Edad Actual (años)” y “Superficie (ha)” del rodal, están enlazados a un control up-down para modificar su valor.
- Cajas de texto combinada, para la seleccionar el “Nombre Especie” asociada a un sitio forestal, el “Estado” del rodal (disponible y no disponible), el “Identificador Sitio” asociado al rodal y la “Estructura de la Formación” del rodal (monte alto o monte bajo).
- Botón para desplegar ventana de especies y sitios disponibles.

- Grilla de datos y botones enlazados por controles de base de datos ADO al archivo “datos.mdb”, que muestra de manera resumida los datos de especies, sitios forestales y rodales que pertenecen al patrimonio a planificar.

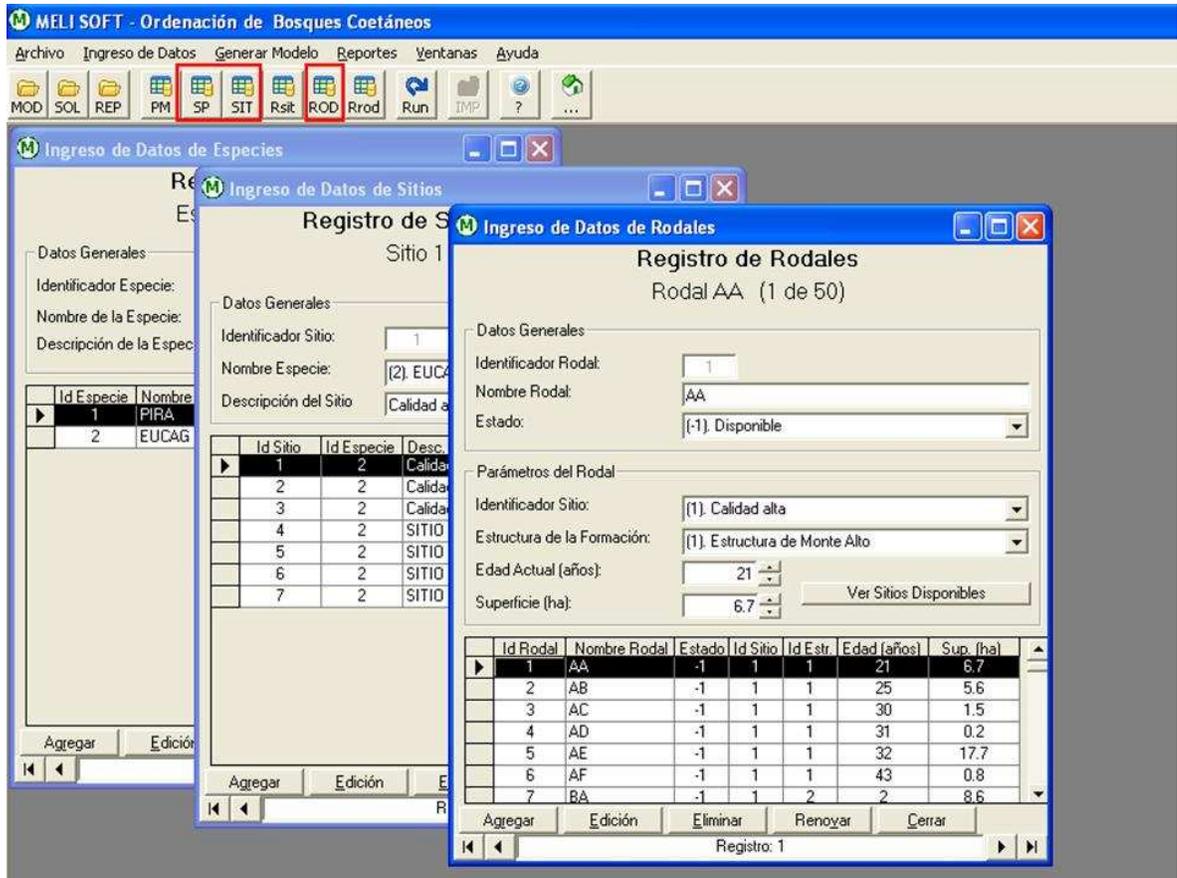


Figura 12. Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ingreso de Datos del Patrimonio Actual, para Especies, Sitios y Rodales de MELISOFT.

La interfaz para registrar y/o modificar los datos de rendimientos de cosecha y raleo de los rodales y sitios, con los cuales se inicia la planificación, también denominados como bosque viejo y bosque nuevo respectivamente, utiliza los siguientes controles (Figura 13):

- Cajas de texto combinadas que permiten seleccionar un sitio y/o rodal específico.
- Grilla de datos para ingresar y/o modificar los rendimientos de cosecha y raleo.
- Gráfico de rendimientos volumétricos de cosecha para el rodal y/o sitio especificado por edad del bosque.

- Botón de acción para guardar los rendimientos de cosecha y raleo.

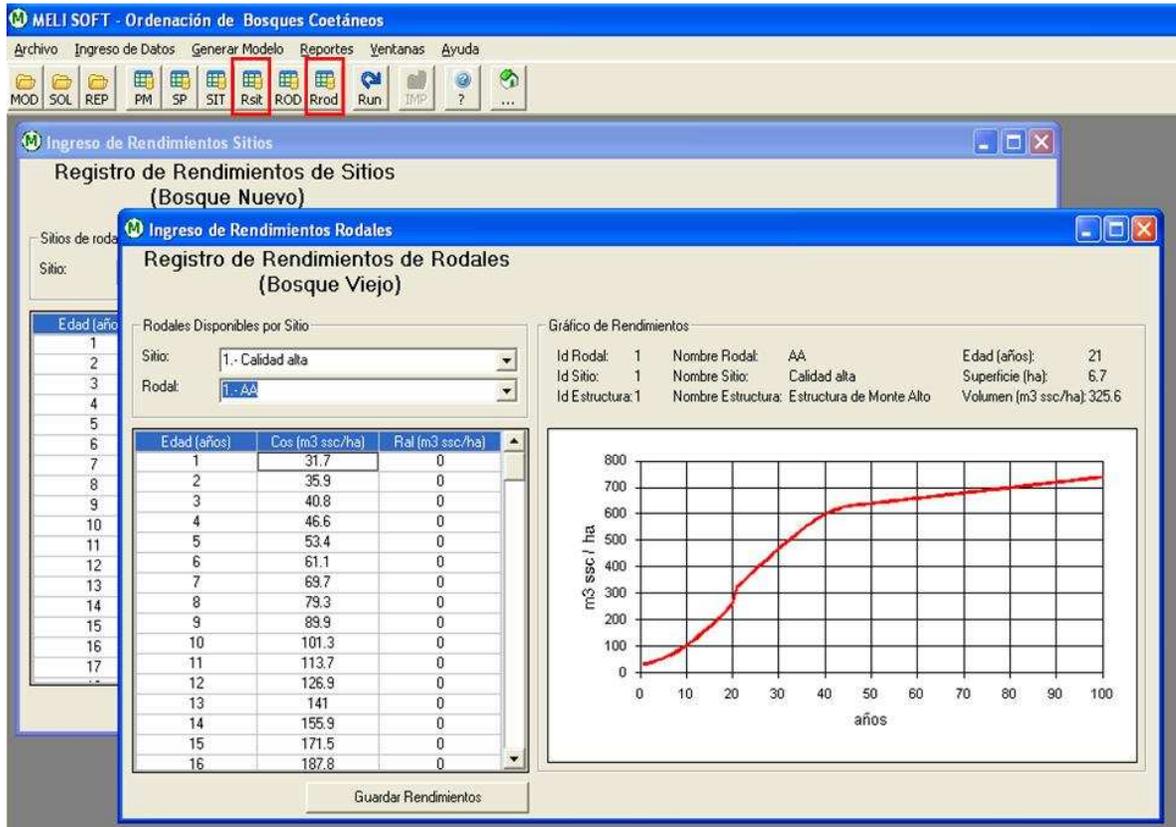


Figura 13. Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ingreso de Datos de Rendimientos de Sitios (Bosque Nuevo) y Rendimientos de Rodales (Bosque Viejo) MELISOFT.

Módulo Generar Modelo

Esta interfaz gráfica, está compuesta por un elemento del menú contextual, un ícono de inicio rápido en la barra de herramientas y por una ventana informativa (Figura 14). Los controles incrustados en la ventana son:

- Botón de acción “Formular – Resolver – Evaluar MELI”. Activa el proceso de transformación de datos de cada plan de ordenación alternativo.
- Cajas de texto simple. En el control situado en la parte superior de la ventana, se imprime información acerca del software, fecha y hora de inicio del proceso de transformación de datos. En el control ubicado en la porción inferior de la ventana, se imprimen todas las etapas del proceso de transformación de datos de cada plan de ordenación alternativo una vez pulsado el botón de acción.

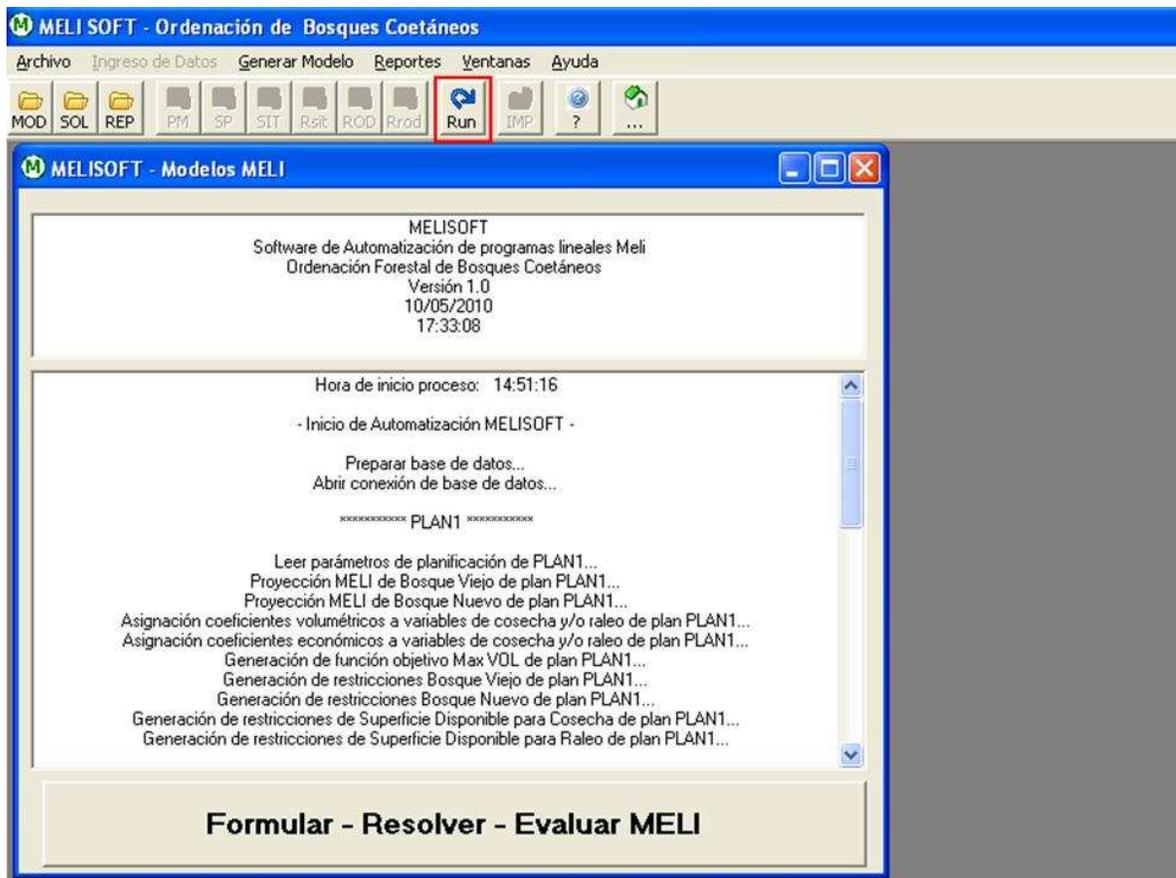


Figura 14. Interfaz gráfica del usuario para el módulo Generar Modelo de MELISOFT.

Módulo Imprimir Reportes

El módulo imprimir reporte tiene una interfaz gráfica que integra a diversos elementos del menú contextual, un botón de inicio rápido en la barra de herramientas, una ventana que expone el proceso de importación de reportes (desde formato Microsoft Access 2003 a Snapshot Viewer 11.0) y múltiples ventanas que visualizan los reportes generados por la aplicación (Figura 15).

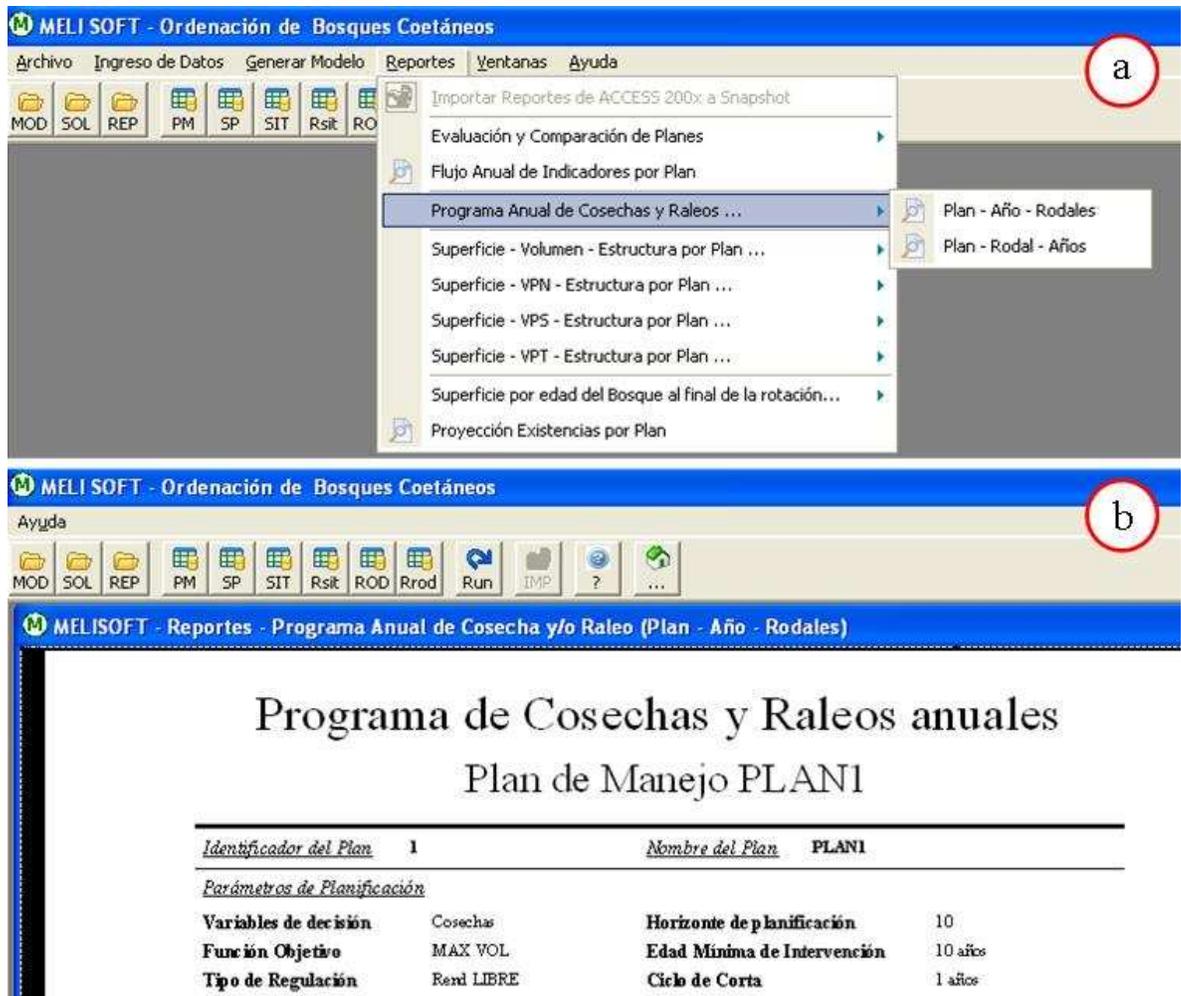


Figura 15. Interfaz gráfica del usuario para el módulo Reportes de MELISOFT, donde: a) elementos del menú contextual para los tipos de reportes; b) Visor de reportes.

Módulo Ayuda

El módulo de ayuda tiene una interfaz gráfica de navegación por los temas de ayuda, además permite buscar palabras claves en el contenido y el índice (Figura 16).

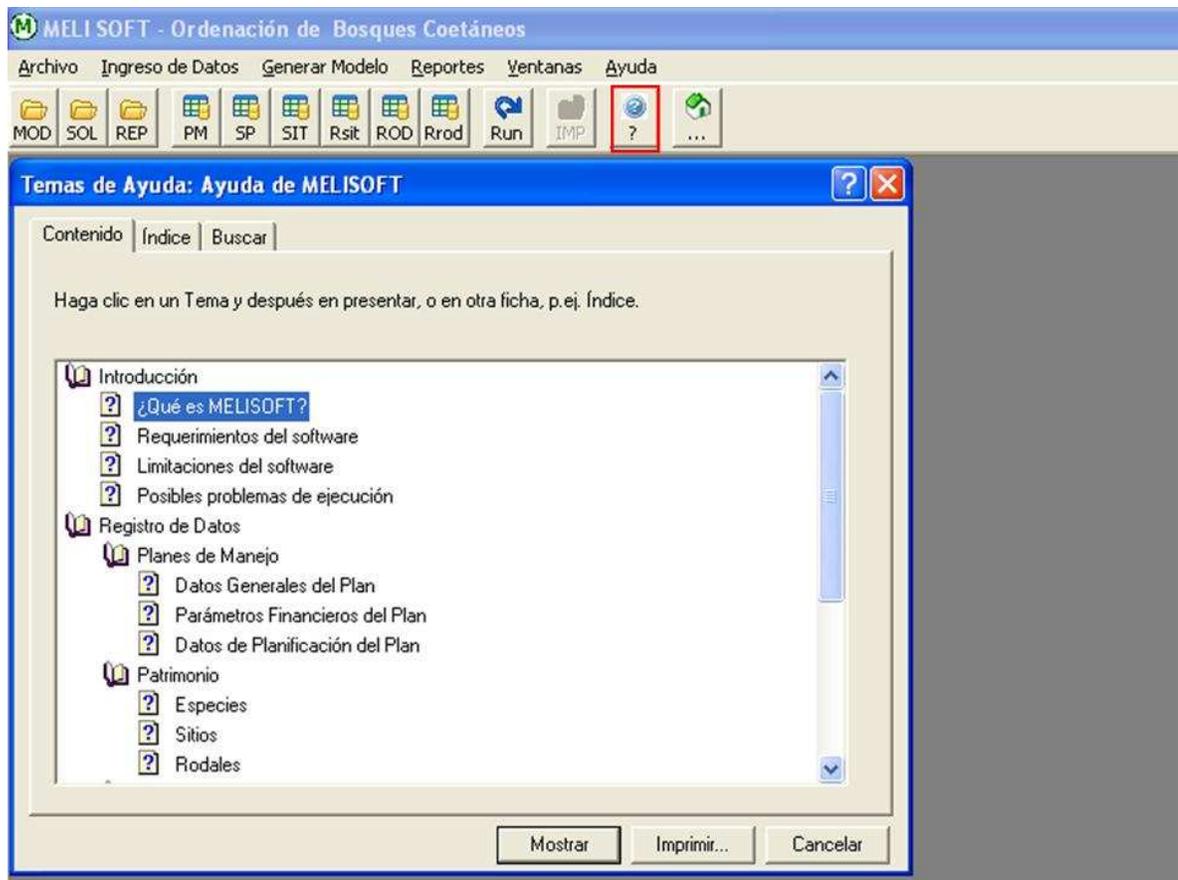


Figura 16. Interfaz gráfica del usuario para el módulo Ayuda de MELISOFT.

6.1.3.4 *Detalle procedimental*

La formulación, resolución y evaluación automática de modelos MELI para planes de ordenación forestal en bosques coetáneos, sigue una secuencia lógica de procesos y funciones incorporada en MELISOFT, desagregadas en los módulos de Ingreso de Datos, Generar Modelo y Reportes.

Basado en el diseño de la estructura de datos, la arquitectura del software y la interfaz gráfica del usuario, se tiene que: los procesos y funciones de MELISOFT se inician cuando el usuario ingresa todos los objetos de datos de entrada de los planes de ordenación alternativos a considerar en el módulo de Ingreso de Datos; posteriormente, el software transformará esta información en objetos de datos de proceso y salida, por medio de las funciones de formular, resolver y evaluar los modelos MELI, integradas en el módulo Generar Modelo; procesados todos los planes de ordenación alternativos, se crean y visualizan los reportes con interpretación forestal en el módulo de Reportes; si el usuario

decide crear más planes, el ciclo se inicia nuevamente, de lo contrario finaliza la automatización de MELISOFT (Figura 17).

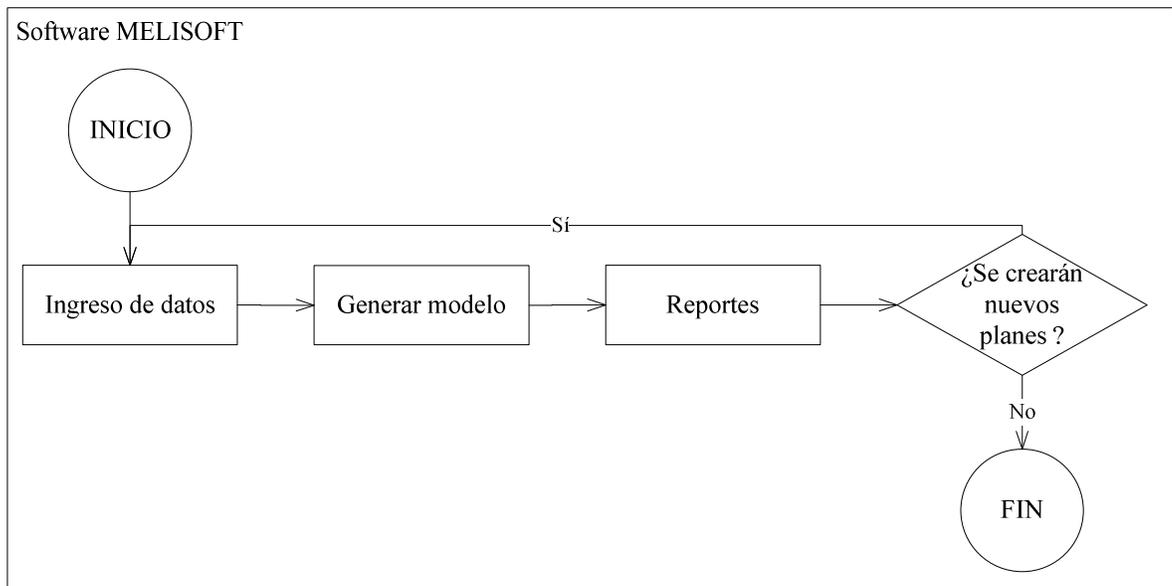


Figura 17. Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar por MELISOFT.

Cada módulo de procesos y funciones de MELISOFT son detallados a continuación en un diagrama de flujo más específico.

Módulo Ingreso de Datos

El módulo se inicia cuando el usuario decide ingresar y/o modificar los objetos de datos de entrada (acápite 6.1.3.1), registrados en el archivo “Datos.mdb” de MELISOFT, concernientes a los tópicos: Planes de Manejo, Patrimonio Actual y Rendimientos Volumétricos (Figura 18).

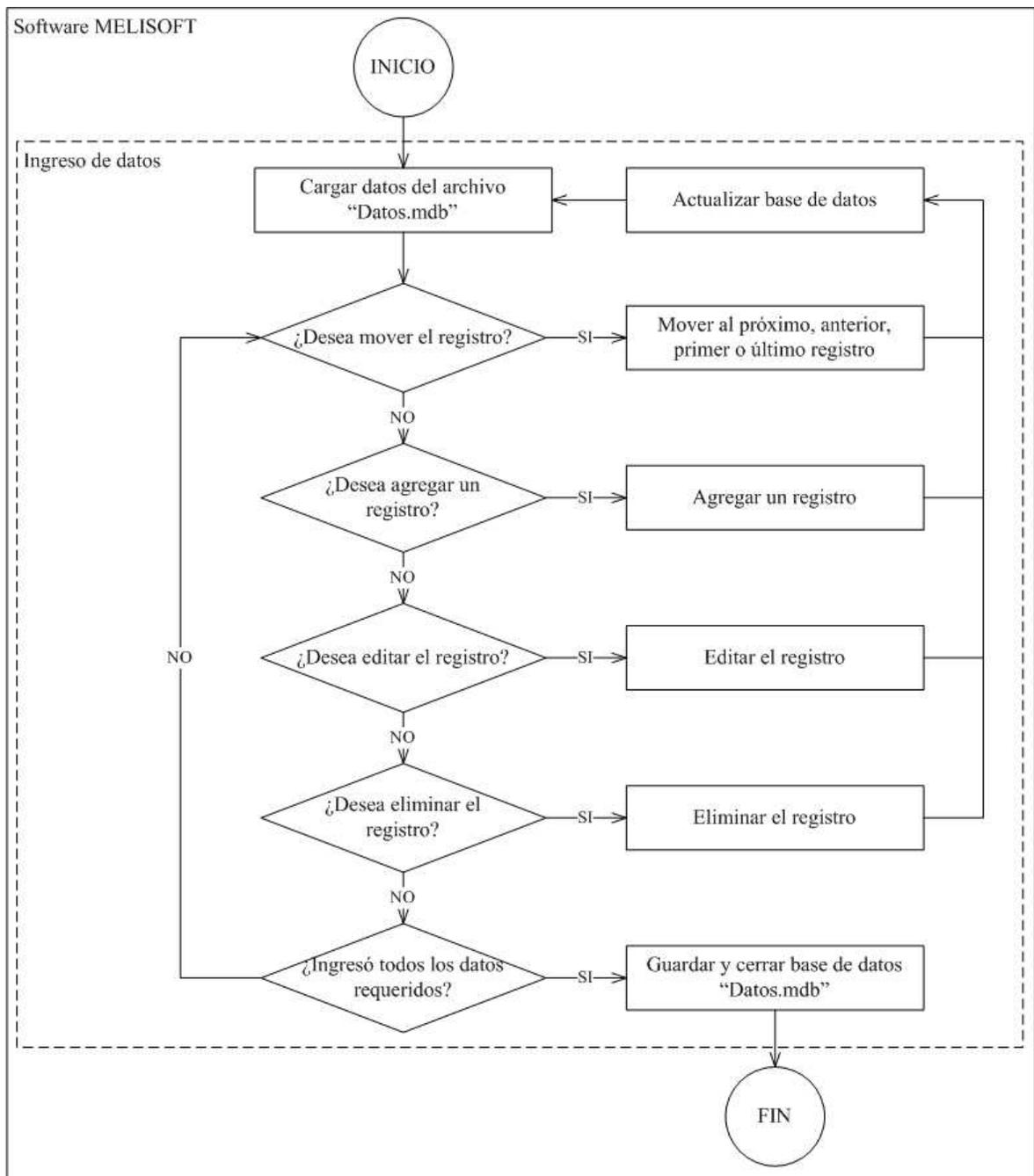


Figura 18. Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar en el módulo de Ingreso de Datos de MELISOFT.

La manipulación de los datos en el software se realiza a través de funciones de base de datos, tales como: mover el registro (próximo registro, anterior registro, primer registro, último registro), agregar registro, editar registro, eliminar registro y actualizar base de datos. El fin del ciclo se cumple cuando el usuario ha ingresado toda la información básica requerida por el módulo Generar Modelo de MELISOFT (Figura 18).

Módulo Generación de Modelo

Este módulo consta de tres funciones principales, tales como: formular modelo, resolver modelo y evaluar modelo (Figura 19).

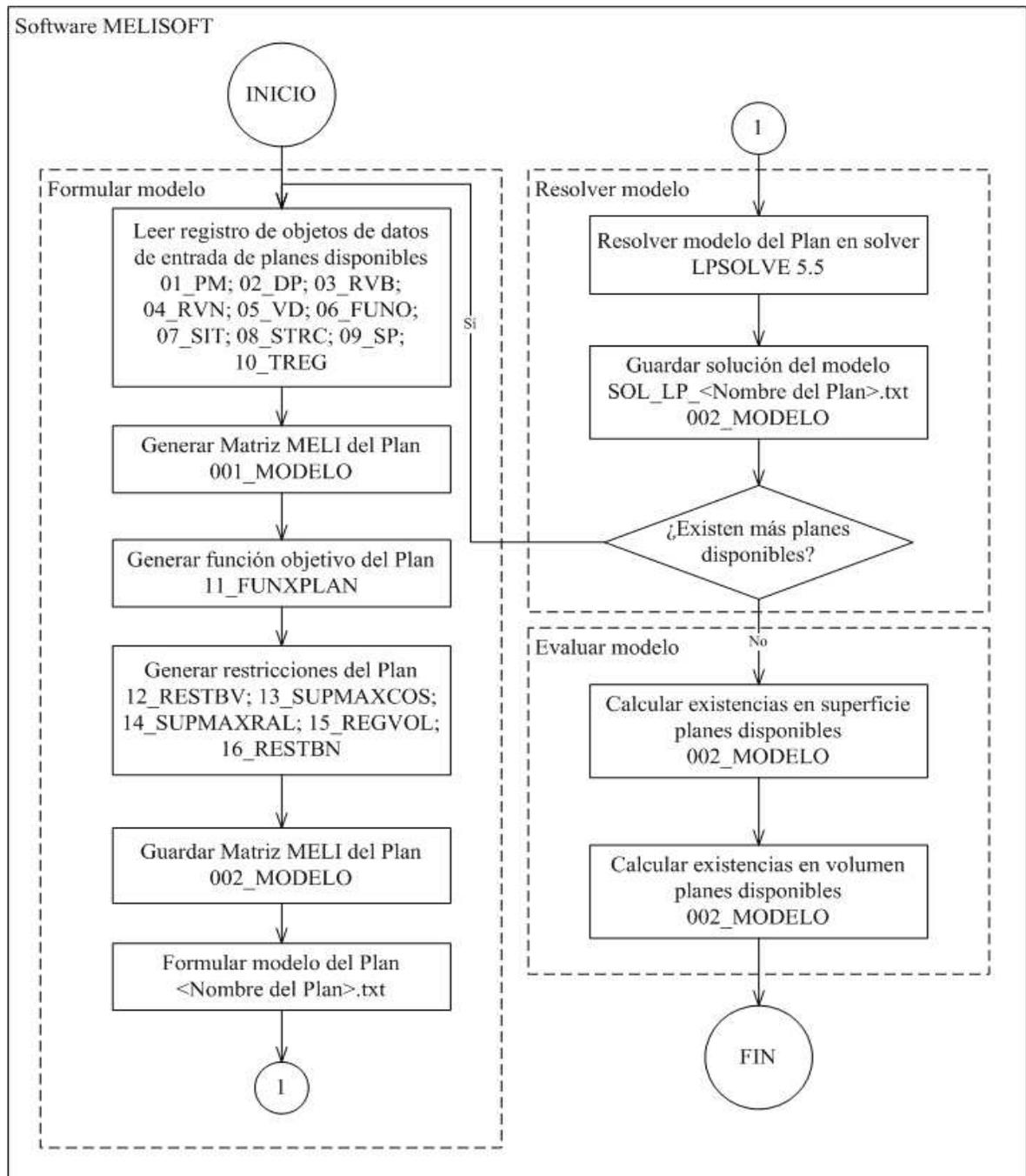


Figura 19. Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar en el módulo Generar Modelo de MELISOFT.

La formulación del modelo comienza con la lectura de los objetos de datos de entrada de los planes de ordenación que el usuario estipule disponibles. MELISOFT transforma esta información en objetos de datos de proceso, configurando de esta manera la matriz MELI, la función objetivo y las restricciones de cada plan de ordenación alternativo. La información procesada es almacenada en los archivos “Datos.mdb” y <Nombre del Plan>.txt. Posteriormente, la función resolver modelo, utiliza como información de entrada el modelo formulado y almacenado en <Nombre del Plan>.txt, procediendo a resolver el programa lineal en el solver LPSOLVE 5.5, obteniendo como resultado la solución primal del plan disponible, guardada en el archivo SOL_LP_<Nombre del Plan>.txt y tabulada en la tabla de datos 002_MODELO del archivo de base de datos “Datos.mdb”, ambos objetos de datos de salida. El ciclo del algoritmo, formular y resolver modelo, se realiza hasta que ya no existan planes de ordenación disponibles para procesar (Figura 19).

Por último, la función evaluar modelo permite calcular las existencias en superficie y volumen del patrimonio forestal, susceptible a la ordenación, para todos los años del horizonte de planificación de cada plan de ordenación alternativo que el usuario haya definido como disponible para su procesamiento (Figura 19).

Módulo Reportes

La generación de reportes con interpretación forestal en MELISOFT, encadena la ejecución de dos funciones consecutivas, es decir, importar y visualizar reportes. Para importar un reporte, primero es necesario realizar una consulta de selección en lenguaje estructurado (SQL) a los objetos de datos de entrada y salida, almacenados en “Datos.mdb”, dando origen a los objetos de datos de consulta, información básica que alimenta a los reportes diseñados en Microsoft Access 2003. Estos últimos, al ser importados a archivos <Nombre del reporte>.snp, con formato Snapshot, componen a los objetos de datos de reportes, pudiendo ser visualizados con el visor de reportes de MELISOFT (Figura 20).

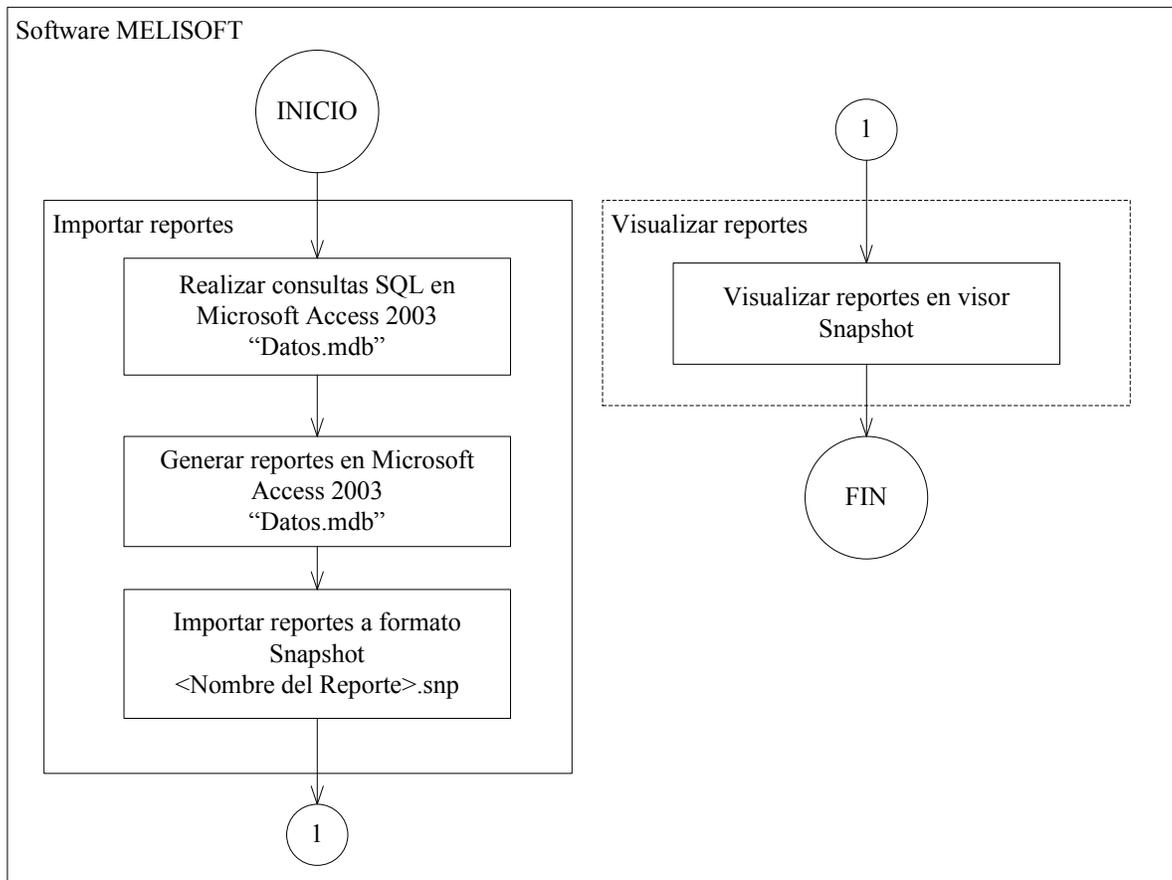


Figura 20. Diagrama de flujo de los procesos y funciones a realizar en el módulo Reportes de MELISOFT.

Con el módulo reportes culmina el ciclo de procesamiento de información de MELISOFT, pudiendo el usuario decidir, a través del análisis de la información disponible y generada por el software, si es necesario reformular el problema y comenzar nuevamente el ciclo (Figura 17).

6.1.4. Generación de código

La generación de código y compilación de MELISOFT se realizó en el lenguaje de programación Visual Basic 6.0, bajo entorno Windows. La estructura de datos, arquitectura del software, interfaz gráfica del usuario y el detalle procedimental se tradujo en la confección y programación de eventos de 28 formularios de ingreso y salida de datos, en los cuales se han incrustado un total de 266 controles visuales, con el objeto de mejorar el desempeño de la interfaz gráfica del usuario.

El código del software diseñado cuenta con un total de 10,220 líneas de texto, donde 8,704 líneas son escritura de código de programación y 1,516 líneas son escritura de comentarios, equivalentes al 85% y 15% del total de líneas respectivamente. Estas se distribuyen en 512 procedimientos, los cuales contienen a todas las instrucciones ejecutables de las subrutinas y funciones declaradas en el software, incluyendo el módulo de clase `lpsolve55.cls`, que posibilita el uso, desde MELISOFT, de la librería de funciones del software de resolución de programas lineales `solvers LPSOLVE 5.5`, y el módulo `configreg.bas`, que permite cambiar la configuración regional del computador, modificando los símbolos de separación de decimales y miles de los números, con el fin de asegurar la correcta operación del `solvers` señalado.

El instalador de MELISOFT 1.0 se encuentra en el material acompañante digital de esta Memoria de Título (Apéndice III).

6.1.5. Pruebas del software

La estrategia de construcción del software fue diseñar, programar y probar cada módulo de la aplicación. De manera implícita, la detección y corrección de errores se realizó en cada etapa, a través de simulaciones de casos extremos de aplicación.

Las etapas de ingeniería y modelado de sistemas de información (acápite 6.1.1) y análisis de requisitos (acápite 6.1.2) fueron de crucial importancia en la comprensión acabada del sistema y de los alcances de la solución computacional demandada. La esencia de las pruebas del software estuvo en la verificación exhaustiva de las funciones específicas de cada módulo, cuya consecuencia fue la depuración y mejoramiento cíclico del rendimiento, documentación del software, base de datos y algoritmos utilizados en la etapa de diseño (acápite 6.1.3) y generación de código (acápite 6.1.4). La calidad del producto fue asegurada en todas las etapas de construcción del software, demostrándose posteriormente en la fase de validación funcional de éste.

6.2. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE

6.2.1. Definición del problema de ingeniería

El siguiente análisis de caso aborda el problema de la formulación, evaluación, comparación y selección automática, del mejor plan de ordenación alternativo de la secuencia de cosechas y reforestación para un patrimonio forestal de 1.200 ha de plantaciones exóticas de *Eucalyptus globulus*, ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Región de Valparaíso, Chile, aplicando el software MELISOFT.

6.2.2. Elementos de la ordenación forestal

6.2.2.1 *Clasificación de la superficie del patrimonio a ordenar*

Tal cual se muestra en el cuadro 3 (acápito 5.1.1.2), el patrimonio forestal a ordenar se distribuye en 156 rodales, con diferentes calidades del sitio, estructura de la masa y edades de plantación. Para simplificar el problema de ingeniería, se procedió a agregar, de forma consistente, la información disponible del bosque con el fin de clasificar la superficie del patrimonio a ordenar. Los criterios de clasificación fueron:

- 1) Declarar a todos los rodales que poseen estructura de monte medio como rodales con estructura de monte alto⁴: la información básica respectiva a los rendimientos volumétricos (m^3 ssc/ha) de rodales con estructura de monte alto y monte medio, proporcionada por CONAF, no muestran diferencia en las estimaciones para las unidades dasocráticas que presentan igual calidad de sitio y edad de plantación. Por esta razón, se ha convenido suprimir el tipo de estructura de monte medio para permutarla a monte alto, y sólo trabajar con dos tipos de estructura de la masa, monte bajo y monte alto.

⁴ La definición de este criterio de clasificación no va en desmedro de aquellos rodales que posean estructura de monte medio, los cuales representan al 36% de la superficie del patrimonio a ordenar. Además, este tipo de estructura es considerada de baja productividad, de manejo silvícola complejo y con productos poco uniformes que dificultan las operaciones de cosecha y su posterior comercialización, situación que debe corregirse a través de un tratamiento silvícola adecuado que tienda a establecer plantaciones con dos tipos de estructura, monte alto regular y monte bajo regular.

2) Clasificar la superficie del patrimonio en macro-rodiales: dado que el modelo de ordenación territorial MELI, incorporado en el software MELISOFT, tiende a fragmentar los rodales conforme avanza el horizonte de planificación en el plan de ordenación, se han generado nuevas unidades de manejo denominadas macro-rodiales, las cuales agregan la superficie de aquellos rodales que poseen igual calidad de sitio, estructura de la masa y edad de plantación. El definir macro-rodiales disminuye la fragmentación de los rodales y flexibiliza la toma de decisiones del gestor en esta área silvestre, respecto a la oportunidad de las intervenciones silvícolas sobre un rodal en un determinado año del horizonte de planificación.

Con la aplicación de los criterios de clasificación de la superficie del patrimonio a ordenar, se redujeron las unidades de manejo desde 159 rodales a 43 macro-rodiales. Estos últimos, se emplazan en tres calidades de sitio diferentes, poseen dos tipos de estructura de la masa forestal y sus edades fluctúan entre los dos años y los 43 años. A continuación se detalla la condición inicial del patrimonio forestal a ordenar.

Cuadro 5. Identificación de macro-rodiales de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* a ordenar, ubicados en el sitio de calidad buena, hacia el año 2008.

| Macro-rodal | Índice de sitio | Estructura | Edad al 2008 (años) | Cuenta de rodales | Superficie (ha) | Volumen total (m ³ ssc) |
|--------------|---|------------|---------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
| 1 | Sitio calidad buena IS ₂₀ = 37,8 m | Monte alto | 21 | 1 | 6,7 | 2.182 |
| 2 | | | 25 | 1 | 5,6 | 2.176 |
| 3 | | | 30 | 1 | 1,5 | 687 |
| 4 | | | 31 | 1 | 0,2 | 94 |
| 5 | | | 32 | 5 | 17,7 | 8.544 |
| 6 | | | 43 | 1 | 0,8 | 464 |
| 7 | | Monte bajo | 2 | 2 | 8,6 | 151 |
| 8 | | | 4 | 1 | 11,3 | 416 |
| 9 | | | 5 | 2 | 1,3 | 62 |
| 10 | | | 11 | 5 | 44,5 | 4.735 |
| Total | | | | 20 | 98,2 | 19.510 |

El sitio de calidad buena integra a 10 macro-rodiales, los cuales contienen a 20 rodales y acumulan una superficie de 98,2 ha, representando el 8% de la superficie patrimonial a ordenar. Un 33% de la superficie del sitio posee estructura de monte alto y otro 67% estructura de monte bajo. Hasta el año 2008, se acumuló en el sitio un volumen total de

19.510 m³ ssc y las edades de los macro-rodiales se distribuían en un rango desde los dos años a los 43 años. (Cuadro 5).

Cuadro 6. Identificación de macro-rodiales de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* a ordenar, ubicados en el sitio de calidad media, hacia el año 2008.

| Macro-rodial | Índice de sitio | Estructura | Edad al 2008 (años) | Cuenta de rodiales | Superficie (ha) | Volumen total (m ³ ssc) | | |
|--------------|---|------------|---------------------|--------------------|-----------------|------------------------------------|------|-------|
| 11 | Sitio calidad media IS ₂₀ = 31,7 m | Monte alto | 6 | 11 | 73,5 | 3.014 | | |
| 12 | | | 8 | 1 | 82,7 | 5.814 | | |
| 13 | | | 9 | 1 | 150,1 | 12.834 | | |
| 14 | | | 13 | 2 | 76,0 | 11.278 | | |
| 15 | | | 19 | 1 | 5,8 | 1.404 | | |
| 16 | | | 21 | 2 | 40,9 | 11.113 | | |
| 17 | | | 25 | 1 | 13,3 | 4.362 | | |
| 18 | | | 26 | 1 | 2,9 | 989 | | |
| 19 | | | 29 | 1 | 4,3 | 1.629 | | |
| 20 | | | 30 | 1 | 1,2 | 469 | | |
| 21 | | | 31 | 12 | 62,2 | 25.004 | | |
| 22 | | | 32 | 23 | 78,6 | 32.462 | | |
| 23 | | | 37 | 2 | 6,1 | 2.813 | | |
| 24 | | | 41 | 1 | 6,8 | 3.340 | | |
| 25 | | | Monte bajo | Monte bajo | 2 | 21 | 78,9 | 994 |
| 26 | | | | | 3 | 3 | 16,4 | 321 |
| 27 | | | | | 4 | 5 | 12,3 | 341 |
| 28 | | | | | 5 | 3 | 19,4 | 704 |
| 29 | | | | | 6 | 2 | 26,7 | 1.207 |
| 30 | | | | | 9 | 2 | 2,7 | 193 |
| 31 | | | | | 11 | 16 | 47,8 | 4.154 |
| 32 | | | | | 12 | 2 | 8,9 | 836 |
| 33 | | | | | 13 | 3 | 53,7 | 5.386 |
| 34 | | | | | 14 | 1 | 8,8 | 934 |
| Total | | | | 118 | 880 | 131.594 | | |

En el sitio de calidad media se clasificaron 24 macro-rodiales, los cuales agrupan a 118 rodiales, y cuya extensión ostenta el 73% de la superficie total a ordenar. Un área de 604,4 ha, 69% de la superficie del sitio, posee estructura de monte alto y 275,6 ha, 31% de la superficie del sitio, posee estructura de monte bajo. Hasta el año 2008, el sitio acumulaba un volumen total de 131.594 m³ ssc y la edad de plantación de los macro-rodiales se encontraba en un intervalo entre los dos años y 42 años (Cuadro 6).

Cuadro 7. Identificación de macro-rodales de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* a ordenar, ubicados en el sitio de calidad baja, hacia el año 2008.

| Macro-rodal | Índice de sitio | Estructura | Edad al 2008 (años) | Cuenta de rodales | Superficie (ha) | Volumen total (m ³ ssc) |
|--------------|--|------------|---------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
| 35 | Sitio calidad baja IS ₂₀ = 25,5 m | Monte alto | 8 | 1 | 19,8 | 915 |
| 36 | | | 13 | 9 | 192,6 | 21.475 |
| 37 | | | 16 | 1 | 3,5 | 532 |
| 38 | | | 26 | 1 | 1,9 | 530 |
| 39 | | | 32 | 2 | 1,6 | 549 |
| 40 | | Monte bajo | 2 | 1 | 2,5 | 19 |
| 41 | | | 3 | 1 | 0,4 | 5 |
| 42 | | | 4 | 1 | 1,3 | 24 |
| 43 | | | 12 | 1 | 4,8 | 353 |
| Total | | | | | 18 | 228,4 |

El sitio de calidad baja comprende a nueve macro-rodales, compuestos por 18 rodales, con una superficie conjunta de 228,4 ha, participando con un 19% de la superficie patrimonial a ordenar. En la mayor parte de la superficie (96%) se encuentran plantaciones con estructura de monte alto. Hasta el año 2008, se acumuló en el sitio un volumen total de 24.403 m³ ssc y las edades de plantación de los macro-rodales se distribuían en un rango desde los dos años a los 32 años. (Cuadro 7).

Todos los macro-rodales que inician la planificación y sus porciones residuales, generadas durante el período de conversión a partir de las intervenciones silvícolas de cosecha sobre ellos, se denominan como bosque viejo. Por otro lado, la superficie cosechada en el bosque viejo durante el período de conversión da lugar a la creación de macro-rodales de segunda y/o tercera rotación de la cepa de eucalipto, cuya estructura de la masa es de monte bajo, éstas unidades de manejo se denotan como bosque nuevo.

6.2.2.2 *Silvicultura aplicada a plantaciones de eucalipto*

La silvicultura aplicada a los macro-rodales, pertenecientes al patrimonio a ordenar, tiene como objetivo la producción de metro ruma de eucalipto para el abastecimiento de materia prima a la industria de celulosa. Según sea la estructura de la plantación, se distinguen dos tipos de tratamientos silviculturales, uno para el manejo del monte alto y otro para el manejo del monte bajo, diferenciándose básicamente en el método de regeneración y establecimiento de la plantación. Los dos tratamientos asumen corta a tala rasa como método de cosecha.

La silvicultura aplicada a los macro-rodiales con estructura de monte alto, originados con plantas de semilla o estacas enraizadas en vivero, se define como: Año 1, plantación a una densidad de 1.250 plantas/ha y espaciamiento de 4 metros, entre hileras, por 2 metros, entre plantas; Sin cortas intermedias durante la rotación; Año 12, corta a tala rasa.

En los macro-rodiales con estructura de monte bajo, originados de la retoñación de cepas de eucalipto, la silvicultura aplicada es: Año 1, el método de regeneración de la plantación es crecimiento vegetativo de retoños en las cepas del macro-rodal cosechado a tala rasa; Año 3, primer clareo, se establecen a lo más tres retoños por cepa; Año 5, segundo clareo, se dejan a lo más dos retoños por cepa; Año 10, tercer clareo, el retoño que posea los mejores atributos de calidad y cantidad permanecerá en la cepa hasta el final de la rotación: Año 12, cosecha a tala rasa.

El esquema silvícola propuesto, a nivel de hectárea, es una directriz de aplicación general para los rodales de *Eucalyptus globulus* presentes en el área de estudio, pero, a nivel patrimonial, la oportunidad de las intervenciones, sobre todo la de cosecha a tala rasa, debe modificarse conforme a lo indicado en el plan de ordenación alternativo óptimo seleccionado.

6.2.2.3 *Estimación de los rendimientos volumétricos y financieros*

Los rendimientos volumétricos de cada macro-rodal fueron estimados a través de funciones de volumen y de incremento volumétrico anual para bosque nuevo y bosque viejo, según sea la calidad del sitio, la estructura de la masa, la edad de la plantación y la altura dominante del macro-rodal (Anexo I).

MELISOFT integra funciones financieras de valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS) y valor presente total del patrimonio (VPT), que permitieron estimar los rendimientos financieros de cada macro-rodal a partir del volumen proyectado (m^3 ssc/ha) y los parámetros económicos de precio del producto (miles de \$/ m^3 ssc), costo de reforestación (miles de \$ / ha) y tasa de descuento (%) especificados para cada plan de ordenación alternativo.

6.2.3. Planes de ordenación alternativos

Los planes de ordenación alternativos representan diferentes opciones de planificación del patrimonio y su influencia en el objetivo estratégico de la organización. Para esto, se estableció que la silvicultura aplicada a las plantaciones de eucalipto, sujetas a la ordenación forestal, esté diferenciada según sea la estructura de la masa, denotándose en manejo de monte alto y manejo de monte bajo. Los parámetros económicos, tales como: precio del producto, costo de reforestación, gastos generales y tasa de actualización; útiles para la estimación de los indicadores financieros de los planes, se mantienen constantes. Los parámetros de planificación de la función objetivo del modelo matemático, tipo y tasa de regulación de flujo de madera, período de conversión y edad mínima de intervención se combinaron en distintos niveles para constituir a cada plan de ordenación alternativo.

Se declararon 48 planes de ordenación alternativos (Apéndice II), correspondientes a todas las combinaciones posibles de los niveles impuestos a los parámetros económicos y de planificación expuestos en los siguientes acápite.

6.2.3.1 *Parámetros económicos*

Los parámetros económicos que fueron declarados en los planes de ordenación alternativos fueron:

- Precio de producto: se estableció un valor constante por unidad de metro cúbico en pie de 14.000 \$/m³ ssc puesto en predio.
- Costo de reforestación: es igual al gasto actualizado de los clareos realizados a las cepas de eucalipto de un macro-rodal de monte bajo regular al tercero, quinto y décimo año de edad. Para efectos prácticos, se asumió como un valor constante igual al costo de forestación con varetas de especies exóticas en la macrozona 3 (resto de V región y RM), definida en la tabla de costos del año 2008 de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) de Chile, igual a \$ 414.833 por hectárea y aproximado a \$ 415.000 por hectárea.
- Gastos generales: es un valor constante (miles de \$/ha/año) para todo el patrimonio. No afecta a la función objetivo de los planes de ordenación alternativos.

- Tasa de descuento: el área de estudio se encuentra inserta en una unidad de manejo del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), por esta razón se asumió una tasa de descuento igual al 7%, cifra promedio entre los valores recomendados por Cartes *et al* (2007) y el Ministerio de Planificación de Chile (2009) para ser utilizada en la evaluación económica de proyectos sociales. Representa al costo oportunidad de la sociedad cuando el Estado utiliza el dinero fiscal para financiar proyectos.

6.2.3.2 *Parámetros de planificación*

Los planes de ordenación alternativos se diferencian unos de otros según sea la combinación de los parámetros de planificación impuestos.

- Variables de decisión: en todos los planes de ordenación alternativos, la variable de decisión es la superficie a cosechar a tala rasa de un macro-rodal, el año de la rotación i , con edad de plantación j , perteneciente al sitio de calidad k , con estructura de la masa l .
- Función objetivo: se han considerado todas las funciones objetivos que MELISOFT contiene, los cuales son: maximización del volumen, maximización del valor presente neto, maximización del valor potencial del suelo y maximización del valor presente total del patrimonio.
- Tipo y tasa de regulación: se evaluaron dos tipos de políticas de regulación del rendimiento volumétrico del patrimonio, una de rendimiento libre de la producción maderera, y otra de rendimiento constante del flujo anual de madera.
- Horizonte de planificación: las opciones del período de conversión del patrimonio a ordenar se determinó en 10 años, 15 años y 20 años.
- Edad mínima de intervención: los macro-rodales podrán ser intervenidos a lo menos cuando tengan una edad de plantación de 10 años y 12 años.
- Ciclo de corta: la silvicultura de plantaciones de eucalipto no incluyen raleos, por esta razón no existe ciclo de corta.

6.2.3.3 *Criterios de selección del mejor plan*

Los criterios de selección del mejor plan de ordenación alternativo, en orden de importancia y aplicación, son:

- Máximo valor presente total del patrimonio⁵ (VPT): bajo este criterio se seleccionaron, en primera instancia, a los 10 planes de ordenación alternativos que maximizaron el valor de este indicador financiero.
- Mínima superficie no regulada del patrimonio al final del horizonte de planificación⁶: se consideró razonable exigir a los planes de ordenación alternativos, filtrados con el criterio anterior, una superficie no regulada al final del horizonte de planificación a lo más del cinco por ciento de la superficie patrimonial, equivalente a 60,3 ha.

6.2.4. Solución del problema

6.2.4.1 *Comparación de planes ordenación alternativos*

El cuadro 8, muestra el resultado de los 10 mejores planes de ordenación alternativos que cumplen con el primer criterio de selección, es decir, la maximización del valor presente total del patrimonio (en miles de \$).

Todos los planes, menos el plan número siete, tienen como función objetivo la maximización de algún indicador financiero, ya sea valor presente neto (VPN), valor potencial del suelo (VPS) o valor presente total del patrimonio (VPT), observándose que aquellos planes que sólo se diferencian por alguna función objetivo financiera, obtienen los mismos resultados, a nivel agregado, de los indicadores de volumen (m³) y financieros

⁵ El indicador financiero VPT, está en relación directamente proporcional con el cumplimiento del objetivo estratégico de la organización, es decir, la utilización óptima del suelo y vuelo del patrimonio bajo restricciones económicas, silvícolas y de planificación impuestas.

⁶ Es posible que la superficie del patrimonio no quede totalmente regulada al final del período de conversión, debido a que en el inicio de la rotación existen algunos macro-rodiales con edades de plantación inferiores a la edad mínima de intervención impuesta. MELISOFT, al formular automáticamente las restricciones de bosque viejo, en los modelos de optimización MELI de cada plan de ordenación alternativo, no obliga a cosechar totalmente estas unidades de manejo, para así evitar soluciones infactibles dada la imposibilidad de regular completamente el patrimonio forestal, por efecto de la ausencia de superficie disponible para cosecha, en algún año del período de planificación, de macro-rodiales pertenecientes a clases de edades específicas.

(miles de \$), también el programa de cosechas y reforestación es equivalente entre las opciones. Lo anterior, se explica por la alta correlación existente en la estimación de los coeficientes financieros de las funciones objetivos, disponibles en el software MELISOFT, debido a que se derivan de los mismos rendimientos volumétricos y parámetros económicos, los cuales se han mantenido constantes en todos los planes evaluados (Cuadro 8).

En términos agregados, la política de regulación de flujo de madera que muestra un mejor resultado en el objetivo estratégico de la organización es la de rendimiento libre. Esta directriz favorece a la obtención del máximo óptimo de la función objetivo financiera, pero tiene como inconveniente la imposibilidad de mantener una oferta constante de madera, dificultando la satisfacción de compromisos de producción con empresas compradoras de esta materia prima. De manera contraria, los planes que adoptan una política de rendimiento constante de madera, obtienen durante la rotación aproximadamente entre 6 mil a 10 mil m³ ssc más de producción respecto a los planes con política de rendimiento libre (Cuadro 8). La política de rendimiento constante simplifica y favorece la gestión del bosque, ya que mantiene estable el abastecimiento de materia prima hacia los centros de consumo.

El período de conversión, lapso en que se tarda en regular el patrimonio, es de 10 años para la totalidad de los planes, demostrando que la utilización de rotaciones cortas sobre las plantaciones de *Eucalyptus globulus* ubicadas en la zona de estudio, cuya silvicultura aplicada es de monte bajo y monte alto, según sea la estructura de la masa del macro-rodal, es una opción factible que optimiza la utilización del suelo y del vuelo (Cuadro 8).

Los planes identificados como 38, 26 y 14 se planificaron con edad mínima de intervención de 12 años, el resto de los planes tiene como edad mínima de intervención 10 años (Cuadro 8). Por esta razón, una silvicultura que tienda a obtener el máximo rendimiento maderero por hectárea (m³ ssc/ha) en la primera década de edad de las plantaciones de eucalipto de monte alto, y en especial las de monte bajo, a través de una adecuada planificación de la intensidad, oportunidad y especificaciones técnicas de las intervenciones intermedias de claros, permitirá mejorar la gestión del bosque en cuanto a los resultados económicos que se esperan de ella.

Cuadro 8. Solución de los 10 mejores planes de ordenación alternativos, según criterio de maximización del valor presente total del patrimonio (miles de \$), para un patrimonio forestal de 1.200 ha de plantaciones exóticas de *Eucalyptus globulus*, ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, Región de Valparaíso, Chile.

| Id Plan | Nombre del Plan | Función Objetivo | Tipo de regulación de flujo | Patrimonio no regulado | | | Indicadores | | | |
|---------|-----------------|------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | Superficie (ha) | % Sup. Patrimonial | Dispersión máx. edad | VOL (m ³ ssc) | VPN (miles \$) | VPS (miles \$) | VPT (miles \$) |
| 37 | PLAN37 | MAX VPT | Rend LIBRE | 0 | 0,0% | 0 | 218.240 | 2.003.719,45 | 2.071.773,79 | 4.075.493,25 |
| 25 | PLAN25 | MAX VPS | Rend LIBRE | 0 | 0,0% | 0 | 218.240 | 2.003.719,45 | 2.071.773,79 | 4.075.493,25 |
| 13 | PLAN13 | MAX VPN | Rend LIBRE | 0 | 0,0% | 0 | 218.240 | 2.003.719,45 | 2.071.773,79 | 4.075.493,25 |
| 38 | PLAN38 | MAX VPT | Rend LIBRE | 90 | 7,5% | 2 | 214.787 | 1.978.389,10 | 2.045.583,49 | 4.023.972,62 |
| 26 | PLAN26 | MAX VPS | Rend LIBRE | 90 | 7,5% | 2 | 214.787 | 1.978.389,10 | 2.045.583,49 | 4.023.972,62 |
| 14 | PLAN14 | MAX VPN | Rend LIBRE | 90 | 7,5% | 2 | 214.787 | 1.978.389,10 | 2.045.583,49 | 4.023.972,62 |
| 43 | PLAN43 | MAX VPT | Reg VOL | 108,1 | 9,0% | 4 | 223.350 | 1.885.466,93 | 1.949.505,93 | 3.834.972,83 |
| 31 | PLAN31 | MAX VPS | Reg VOL | 108,1 | 9,0% | 4 | 223.350 | 1.885.466,93 | 1.949.505,93 | 3.834.972,83 |
| 19 | PLAN19 | MAX VPN | Reg VOL | 108,1 | 9,0% | 4 | 223.350 | 1.885.466,93 | 1.949.505,93 | 3.834.972,83 |
| 7 | PLAN7 | MAX VOL | Reg VOL | 0 | 0,0% | 0 | 225.104 | 1.861.797,37 | 1.925.032,34 | 3.786.829,76 |

Bajo la exigencia impuesta por el segundo criterio de selección del mejor plan de ordenación alternativo, es decir, un máximo permisible de la superficie no regulada al final del período de conversión a lo más del 5% de la superficie patrimonial, sólo los planes 37, 25, 23 y 7 lo cumplen a cabalidad, ya que éstos terminan regulando completamente, en una rotación de 10 años, la superficie de las plantaciones de eucalipto sujetas al estudio (Cuadro 8). Cabe destacar, que las primeras tres opciones de mejor plan, mencionadas anteriormente, logran el mismo resultado en los indicadores y, en la secuencia de intervenciones silvícolas, por lo tanto, es posible agregarlas en sólo una opción válida, desde ahora representada por el Plan 37. La figura 21 muestra gráficamente la proyección anual de los indicadores de volumen a cosechar, valor presente neto, valor potencial del suelo y valor presente total del patrimonio para los planes de ordenación alternativos Plan 7 y Plan 37, opciones más factibles según los criterios analíticos de selección establecidos.

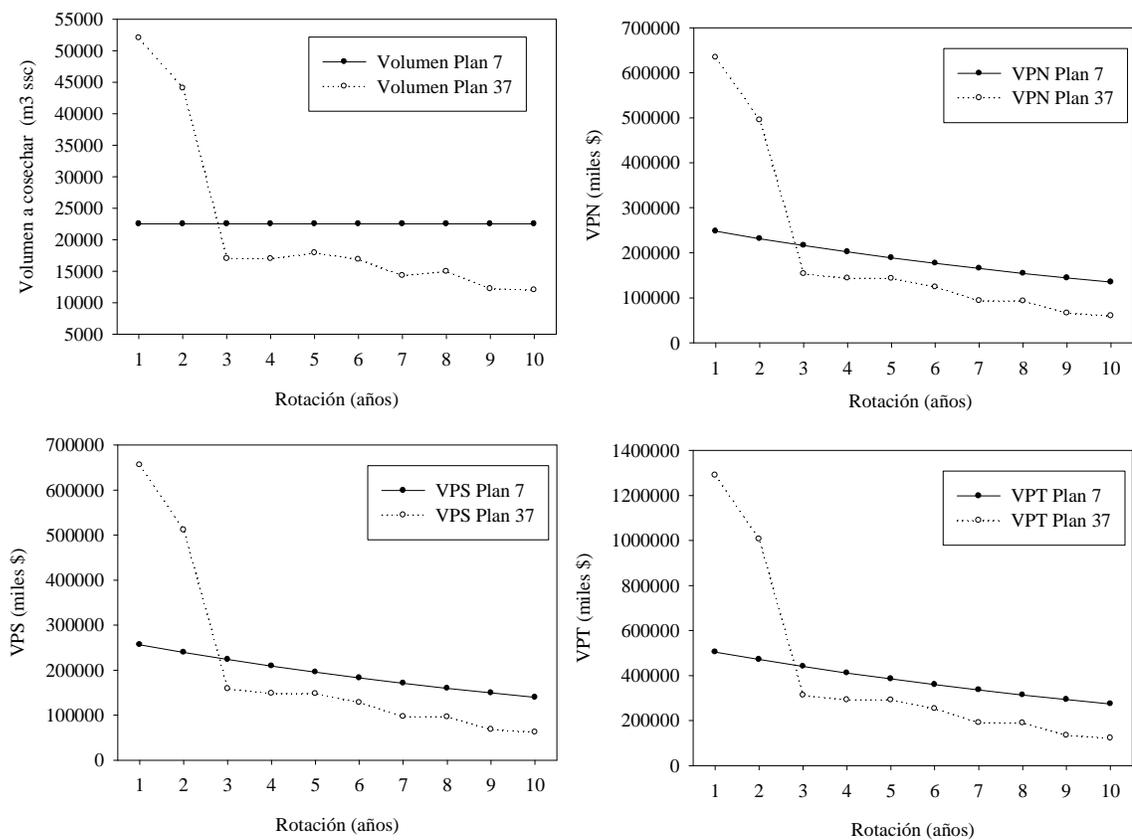


Figura 21. Gráficos que muestran la proyección de los indicadores de volumen anual a cosechar (m^3 ssc), valor presente neto (miles de \$), valor potencial del suelo (miles de \$) y valor presente total (miles de \$) de las mejores opciones a considerar.

La proyección del volumen anual a cosechar por el Plan 7 se mantiene constante a lo largo de la rotación, tomando valores aproximados a los 22.510 m³ ssc anuales. Mientras que para el Plan 37 el volumen anual a cosechar decrece conforme avanza la rotación, remarcando el hecho que el 52 % del volumen total a cosechar durante todo el plan se obtendrá dentro de los primeros tres años del horizonte de planificación. Las proyecciones de los indicadores financieros de los mejores planes alternativos son decrecientes en el tiempo, en donde se destaca la acentuada variabilidad anual de los indicadores del Plan 37 y la suavidad de la curva del Plan 7. En general, el Plan 37 logra valores más altos para todos los indicadores en el primer y segundo año de la rotación, pero en los años consecutivos estos toman valores inferiores a aquellos proyectados en el Plan 7 (figura 21).

6.2.4.2 Selección del plan de ordenación óptimo

En vista de los resultados y los antecedentes expuestos con anterioridad, el plan de ordenación alternativo que mejor cumple los objetivos y metas impuestas por la organización bajo restricciones silvícolas, económicas y de planificación contingentes a la gestión es el Plan 7, dado que:

- La función objetivo maximiza el volumen a cosechar durante la rotación, obteniendo 225.104 m³ ssc, valor superior a todos los otros planes alternativos considerados. Junto a esto, la aplicación de una silvicultura de monte alto y monte bajo en las plantaciones de *Eucalyptus globulus* permitirá aprovechar al máximo la capacidad de producción maderera de la especie, desde una edad mínima de intervención de 10 años.
- Si bien el valor presente total del patrimonio (VPT) del plan 7 es inferior en aproximadamente 288,67 millones de pesos con respecto al plan 37, este último no garantiza que las utilidades financieras se cumplan en la rotación, debido a que el volumen ofertado anualmente será desigual, dificultando la gestión operativa de las cosechas y su posterior comercialización en los centros de consumo. Situación que puede controlarse en mayor medida adoptando una política de rendimiento constante de madera, considerada en el plan 7.

- El plan asume una rotación corta de 10 años, lapso en el cual la superficie del patrimonio quedará totalmente regulada por superficie.

6.2.4.3 Efectos del plan de ordenación óptimo sobre el patrimonio

Estructura de la masa forestal aprovechada

La superficie total a ser cosechada es de 1.200,6 ha, disgregadas en 856,3 ha de plantaciones con estructura de monte alto y, 350,3 ha de plantaciones con estructura de monte bajo. La superficie anual a cosechar en el patrimonio es constante, aproximadamente 120 ha anuales, donde la participación relativa de la superficie a cosechar en macro-rodiales con estructura de monte alto, con respecto a la superficie anual a cosechar, es en siete años, de la rotación, superior al 78% (Figura 22).

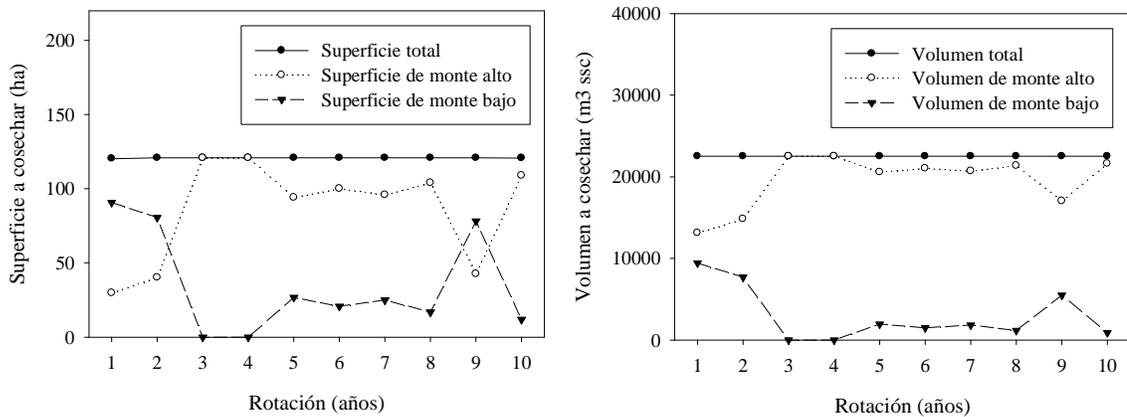


Figura 22. Proyección de la superficie (ha) y volumen (m³ ssc) a cosechar anualmente, por tipo de estructura de la masa forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7.

El volumen total a cosechar durante la rotación es de 225.104 m³ ssc, donde el 87% y 13% proviene de macro-rodiales con estructura de monte alto y monte bajo respectivamente. Describiendo con más detalle, se tiene que las plantaciones con estructura de monte alto aportan, en todos los años de la rotación, al menos con el 58% del volumen anual a cosechar, inclusive en los años donde la superficie a cosechar en macro-rodiales con estructura de monte bajo es mayor a aquellos con estructura de monte alto (Figura 22). La explicación de esta proporción viene dada porque en la resolución del modelo MELI, siempre se privilegia la asignación de superficie a cosechar anualmente a aquellos macro-

rodales que posean mayor edad plantación y que aporten mayor volumen por unidad de superficie, característica principal de los macro-rodales con estructura de monte alto, favoreciendo así la regulación del patrimonio al final del horizonte de planificación.

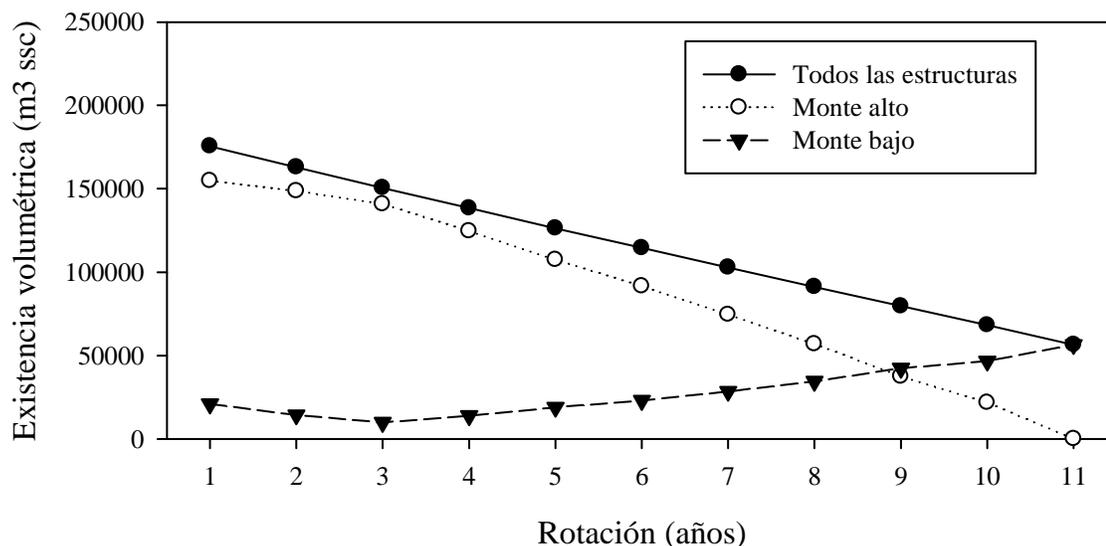


Figura 23. Proyección de las existencias volumétricas anuales (m^3 ssc) del patrimonio, según sea la estructura de la masa forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7.

A lo largo del horizonte de planificación, toda la superficie de bosque viejo con estructura de monte alto, 71% de la superficie patrimonial, será transferida a la superficie de bosque nuevo con estructura de monte bajo, es decir, al término de la rotación, sólo existirán en el patrimonio macro-rodales con estructura de monte bajo. Esta situación que se ve reflejada en la proyección de las existencias volumétricas del patrimonio durante los años de la rotación, según el tipo de estructura de las plantaciones, pudiendo observarse que al inicio de la segunda rotación del patrimonio (año 11), las existencias volumétricas de las plantaciones con estructura de monte bajo son equivalentes a las existencias volumétricas en el patrimonio (Figura 23). En la práctica, esto no implica que sea real, ya que en el presente estudio se desconoce la cantidad de rotaciones de las cepas de eucalipto en los rodales de monte bajo que inician la planificación, por lo cual no es posible especificar, con este nivel de detalle, la oportunidad en el reemplazo y replante de las cepas que posean más de tres rotaciones. Entonces, esta decisión silvícola quedará sometida a un nivel táctico-operativo de planificación, posterior al análisis de la información disponible en los inventarios de pre-cosecha a realizar en las unidades de manejo.

Aprovechamiento por tipo de calidad del sitio

Con respecto a la superficie y volumen total a cosechar durante la rotación, según sea la calidad del sitio de los macro-rodales, se observa que: el 73%, 19% y 8% de la superficie a cosechar proviene de macro-rodales con calidad de sitio media ($IS_{20} = 31,7$ m), baja ($IS_{20} = 25,5$ m) y buena ($IS_{20} = 37,7$ m) respectivamente, cuya significancia en el volumen total a cosechar, en el mismo orden; es del 75%, 14% y 10%. El sitio de calidad media es aprovechado durante todos los años de la rotación, no así los sitios de calidad alta y baja, los cuales no estarán disponibles para cosecha en cinco años y tres años de la rotación respectivamente (Figura 24).

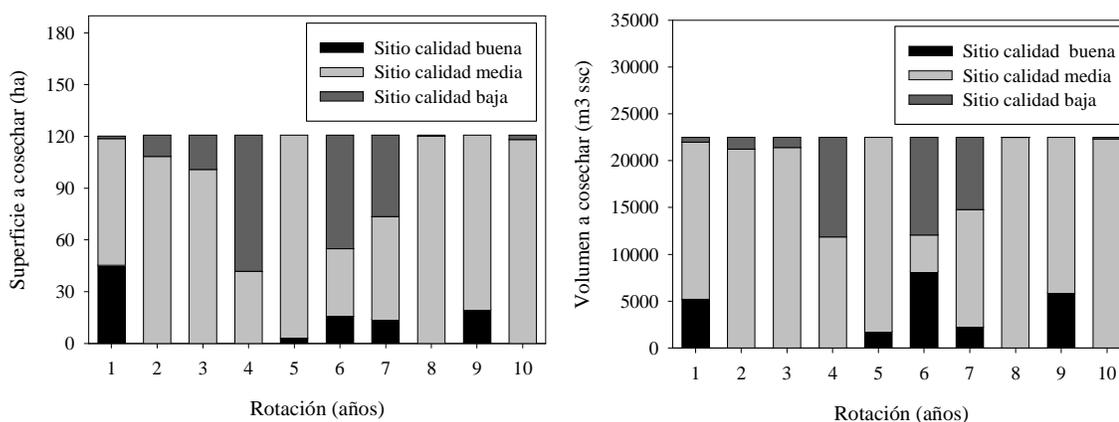


Figura 24. Proyección de la superficie (ha) y volumen (m^3 ssc) a cosechar, por tipo de calidad del sitio forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7.

Las intervenciones silvícolas de cosechas a realizar durante el horizonte de planificación del Plan 7 tendrán como efecto principal sobre el patrimonio, la disminución de las existencias volumétricas en todos los sitios forestales. En términos cuantitativos, el cambio implica una reducción de las existencias volumétricas del patrimonio desde $175.507 m^3$ ssc (11% sitio de calidad buena, 75% sitio de calidad media y 14% sitio de calidad baja), acumulado al inicio de la primera rotación, hasta $56.526 m^3$ ssc (11% sitio de calidad buena, 70% sitio de calidad media y 19% sitio de calidad baja), al iniciar la segunda rotación (Figura 25).

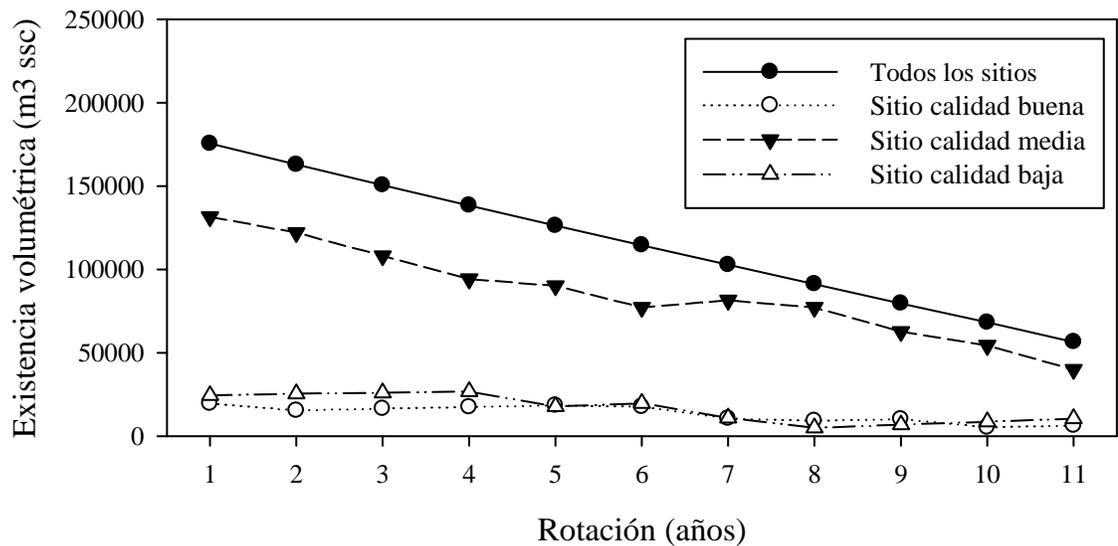


Figura 25. Proyección de las existencias volumétricas anuales (m^3 ssc) del patrimonio, por tipo de calidad del sitio forestal, del plan de ordenación óptimo Plan 7.

El 73% de la superficie patrimonial se localiza en el sitio de calidad media ($IS_{20} = 31,7$ m), por lo tanto es de esperar que una gran porción del volumen total a aprovechar durante la rotación provenga de macro-rodajes pertenecientes a éste, hecho que se denota en la disminución de las existencias volumétricas desde $131.594 m^3$ ssc, al inicio de la primera rotación, hasta $39.839 m^3$ ssc, al inicio de la segunda rotación (año 11). La reducción de existencias volumétricas en los sitios de calidad buena y baja no es tan drástica como en el sitio de calidad media (Figura 25).

Regulación del patrimonio al término de la rotación

La secuencia de intervenciones silvícolas de cosechas, prescritas por el Plan 7, sobre los 43 macro-rodajes que inician la planificación, tiene como resultado la regulación por superficie del patrimonio al término de la rotación, es decir, cada clase de edad del bosque, en total 10 clases de edad, están representadas en tramos equivalentes a 120 ha (Figura 26).

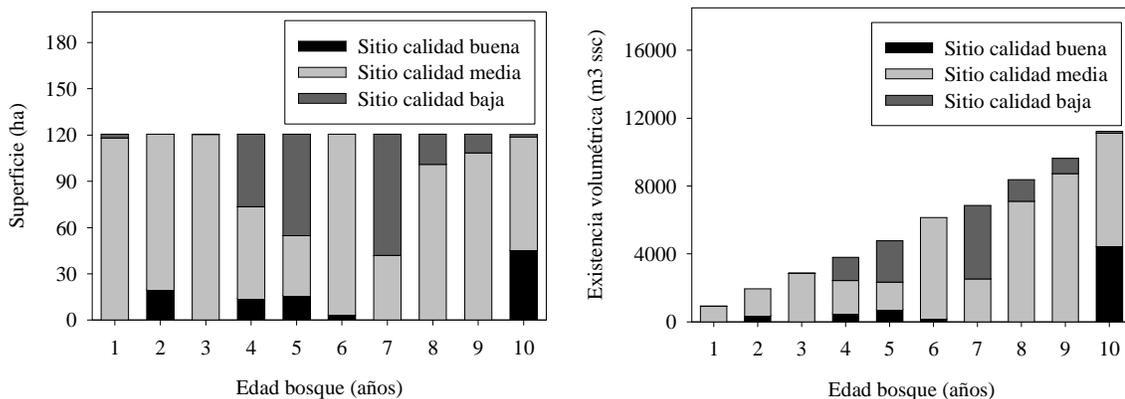


Figura 26. Existencias en superficie (ha) y volumétrica (m³ ssc) al final de la rotación, por clase de edad del bosque y calidad de sitio, del plan de ordenación óptimo Plan 7.

El volumen en pie del patrimonio se distribuye de manera ascendente en los tramos, según aumenta la edad del bosque, oscilando entre 923 m³ ssc, en las plantaciones de un año de edad, hasta 11.235 m³ ssc en las plantaciones de diez años. Cada tramo, está compuesto por macro-rodales procedentes de distintas calidades de sitio, lo cual implica que no necesariamente estas unidades serán equi-productivas en volumen durante el período de post-conversión (Figura 26 y figura 27).

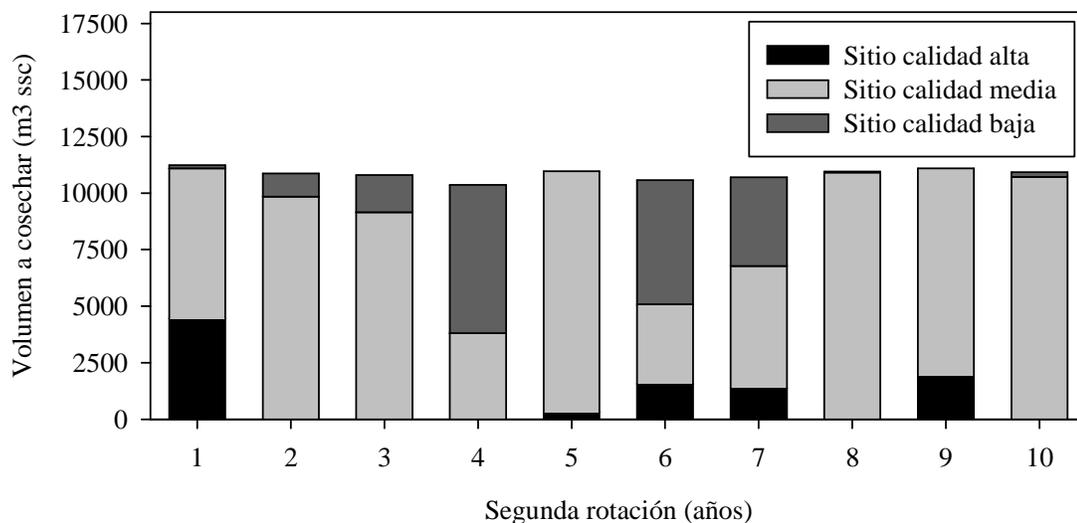


Figura 27. Producción anual de volumen (m³ ssc) durante la segunda rotación del patrimonio en estudio, período de post-conversión del plan de ordenación óptimo Plan 7.

La proyección estimada del nivel de producción anual del patrimonio para la segunda rotación, período de post-conversión del Plan 7, muestra que el flujo de volumen a cosechar anualmente no es estrictamente constante, pero se mantiene estable alrededor del promedio 10.847 m³ ssc, experimentando una variación máxima anual del 4,5%, con respecto a este valor (Figura 27). En conclusión, el modelo MELI formulado para el Plan 7, reguló el patrimonio en tramos de igual superficie, no siendo estos tramos equi-productivos en volumen a la edad de cosecha de 10 años, pero la solución del modelo tiende a mantener en el período de post-conversión la misma política de regulación de flujo impuesta en el período de conversión.

Fragmentación de los macro-rodiales durante la rotación

Durante el período de conversión, se producirá fragmentación⁷ en algunos macro-rodiales que conforman el patrimonio. Pudiendo evidenciarse por el aumento de la cantidad de macro-rodiales desde 43, en el año uno de la rotación, hasta 61, el último año de ésta. El nivel de fragmentación está definido por la cantidad de veces que el modelo decide asignar la intervención de cosecha a un macro-rodal (Cuadro 9).

Cuadro 9. Estadísticas de fragmentación de macro-rodiales del patrimonio en estudio, al término de la rotación, por efecto del plan de ordenación Plan7.

| Grupo | N° intervenciones de cosecha | Cuenta de macro-rodiales | Superficie macro-rodiales (ha) | | | |
|----------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------|----------|---------------|
| | | | Mínima | Máximo | Promedio | Total |
| Sin fragmentar | 1 | 30 | 0,2 | 47,8 | 9,7 | 289,8 |
| Fragmentado | 2 | 18 | 1,2 | 69,6 | 24,1 | 433,3 |
| | 3 | 9 | 5,5 | 68,8 | 32,3 | 290,9 |
| | 4 | 4 | 7,4 | 78,9 | 48,2 | 192,6 |
| Total | | 61 | | | | 1206,6 |

Los macro-rodiales que fueron cosechados en su totalidad, sin generar fragmentación en estos, son en total 30 unidades, cuyas superficies oscilan entre 0,2 ha y 47,8 ha, y agregan el 24% de la superficie patrimonial. Por otro lado, El 76% de la superficie patrimonial será fragmentada, en distintos niveles, durante el período de conversión. Los macro-rodiales de

⁷ Se entiende por fragmentación, al proceso de dividir un macro-rodal en dos o más porciones, por efecto de las intervenciones silvícolas de cosecha de éste.

bosque nuevo generados, provendrán de la fragmentación de 13 macro-rodiales de bosque viejo que inician la planificación, los cuales serán intervenidos por cosechas en dos, tres y cuatro veces durante la rotación, generando una cantidad 18, 9 y 4 macro-rodiales de bosque nuevo respectivamente. Se observa, que el grupo con mayor fragmentación posee macro-rodiales con superficie mínima, máxima y promedio superior a los menos fragmentados (Cuadro 9).

Los sitios que preservarán una mayor cantidad de macro-rodiales sin fragmentar, en orden ascendente, serán el sitio de calidad baja, sitio de calidad buena y sitio de calidad media; en los cuales no serán fragmentados el 89%, 80% y 50% de los macro-rodiales que inician el período de conversión (Cuadro 10).

Cuadro 10. Cuenta, superficie y volumen a cosecha en macro-rodiales durante el horizonte de planificación, según fragmentación y calidad del sitio forestal, del plan de ordenación Plan7.

| Calida del sitio | Macro-rodiales | | | | | |
|---|----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Fragmentados | | | No fragmentados | | |
| | Cuenta | Superficie (ha) | Volumen (m3 ssc) | Cuenta | Superficie (ha) | Volumen (m3 ssc) |
| Calidad buena IS ₂₀ = 37,8 m | 4 | 23,3 | 12.537,2 | 8 | 74,9 | 10.763,1 |
| Calidad media IS ₂₀ = 31,7 m | 23 | 700,9 | 142.643,3 | 14 | 179,1 | 27.194,3 |
| Calidad baja IS ₂₀ = 25,5 m | 4 | 192,6 | 28.265,9 | 8 | 35,8 | 3.699,9 |
| Total | 31 | 916,8 | 183.446,4 | 30 | 289,8 | 41.657,2 |

La dinámica de fragmentación de los macro-rodiales que inician la planificación, muestra que para cumplir con las restricciones del modelo MELI, regulación por superficie del patrimonio al final de horizonte de planificación y política de rendimiento constante de madera, es necesario fragmentar las unidades de manejo durante todos los años de la rotación. La figura 28, muestra el aporte significativo en superficie y volumen a cosechar anualmente con los aprovechamientos a macro-rodiales a fragmentar, cuya cantidad supera el 70% con respecto al total, tanto en volumen como en superficie, en la mayoría de los años de la rotación.

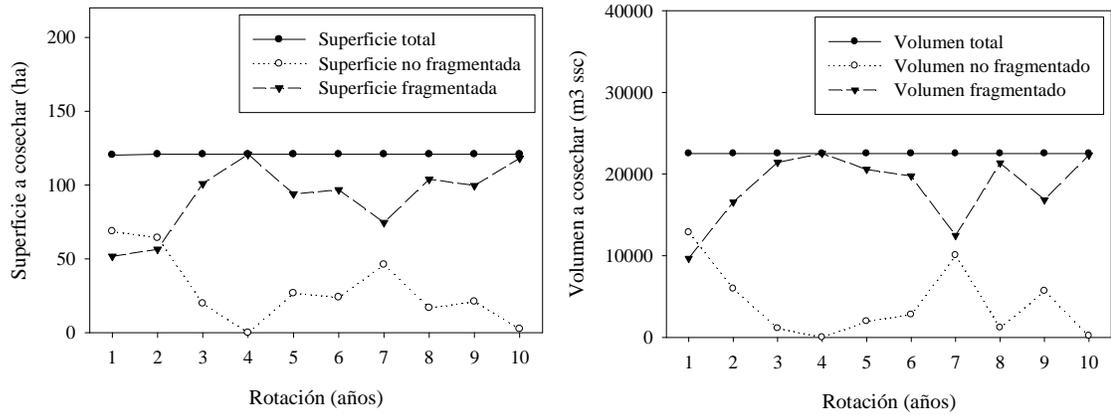


Figura 28. Proyección de la superficie (ha) y volumen (m³ ssc) a cosechar anualmente, según la fragmentación de macro-rodiales, del plan de ordenación óptimo Plan 7.

7. DISCUSIÓN

7.1. SISTEMAS COMPUTACIONALES EN LA PLANIFICACIÓN FORESTAL

La literatura describe extensamente diversos softwares de planificación forestal para el apoyo en la toma de decisiones estratégicas. En su totalidad, el diseño y construcción de este tipo de aplicaciones computacionales, ha considerado la automatización de una o múltiples técnicas de optimización, todas ellas parte de la investigación de operaciones, para la búsqueda de soluciones factibles a los problemas de la gestión forestal (Shao y Reynolds, 2006).

En los acápites 2.3.2 y 6.1.1.3 de la presente investigación, son nombrados algunos sistemas informáticos que utilizan la programación lineal para la ordenación de bosques y que poseen mayor renombre internacional y uso extensivo en la planificación de plantaciones forestales.

La situación en Chile no es alejada al resto del mundo, y sobre todo de los países que han fortalecido su sector forestal basado en la producción intensiva de plantaciones exóticas de rápido crecimiento, tal como Brasil, Sudáfrica y Nueva Zelandia. Desde la creación del Grupo de Producción Forestal en 1988, organización coordinada por Fundación Chile que reunió a la Universidad de Chile, Universidad de Concepción y a las empresas forestales más importantes del país, se han realizado importantes investigaciones para aumentar la eficiencia de la industria forestal chilena utilizando técnicas de optimización, logrando una reducción significativa de los costos y una mejora en la gestión de las operaciones (Epstein *et al.*, 1999). Weintraub *et al* (2000) realizaron un estudio comparativo entre los sistemas de planificación forestal asistido por computadora, que incluyen restricciones medioambientales, entre Chile y Nueva Zelanda. Los investigadores describen y analizan las herramientas más utilizadas por las empresas forestales, en todos los niveles de planificación, pudiendo nombrar las siguientes: OPTIMED, PLANEX, OPTICORT, PLANZ, CONDOR, FOLPI y MARVL. Por último, concluyen que los modelos de optimización y las herramientas de planificación forestal analizados son útiles para la evaluación de diversos escenarios de producción bajo restricciones medio ambientales.

En el ámbito académico, Gili Von Chrismar (1999) desarrolla un software para la regulación de bosques coetáneos con fines docentes, para ser utilizado por los estudiantes de Ingeniería Forestal de la Universidad de Chile. La investigación determina que el software aplicado para el apoyo de actividades docentes no tiene un efecto significativo sobre el aprendizaje de los estudiantes, aunque insiste en el uso de herramientas computacionales de este tipo en la enseñanza forestal. Otros proyectos, similares a MELISOFT, han sido desarrollados en otras universidades del mundo, como por ejemplo:

- LOG (*Linear Optimisation Generator*): creado en la Universidad de Canterbury (Nueva Zelanda), funciona en entorno Windows y está programado en el lenguaje Visual Basic. Utiliza como gestor de base de datos Microsoft Access, y resuelve los modelos de programación lineal, formulados en lenguaje AMPL, con el solver LPSOLVE. El software está diseñado y construido con el objetivo de apoyar la enseñanza de alumnos de ciencias forestales en los tópicos inherentes a la planificación forestal estratégica (Dobbs y Maxwell, 2002).
- SIMO: desarrollado en la Universidad de Helsinki (Finlandia), es un software de código abierto (*open source*) escrito con el lenguaje de programación Python. Simula el crecimiento del bosque y optimiza el aprovechamiento de éste, evaluando diversos escenarios silviculturales y de mercado. Los modelos de programación lineal están formulados en lenguaje JLP. Además incorpora, a nivel experimental, un sistema de información geográfico para otorgar la dimensión espacial-temporal al problema resuelto (Rasinmäki *et al*, 2009).

7.2. ORDENACIÓN FORESTAL EN PLANTACIONES DE EUCALIPTO

7.2.1. Plantaciones de eucalipto en la Reserva Lago Peñuelas

Estudios similares se han llevado a cabo por Gatica (2003) y Gilchrist y Toral (2007) sobre el área de estudio. Estos investigadores han aplicado diferentes criterios de ordenación forestal, tratamientos silviculturales sobre las plantaciones de eucalipto y modelos matemáticos de simulación del comportamiento del bosque y de planificación territorial.

Gatica (2003) evalúa cuatro esquemas de manejo combinado con tres regímenes silviculturales, utilizando un modelo de programación lineal, adaptado por el investigador a las condiciones particulares del área de estudio⁸, para proponer un programa de intervenciones optimizado de cosecha y raleo a una superficie patrimonial de 1.206 ha de plantaciones de *Eucalyptus globulus*, ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas. La propuesta consistió en aplicar una política de corta de rendimiento constante de volumen, los primeros 14 años del período de conversión, y una política de rendimiento sostenido los últimos seis años de la rotación, con una silvicultura que realice tres intervenciones de raleo, cuando la plantación alcance una edad de 8 años, 12 años y 16 años, con una tasa de extracción de la existencia volumétrica del 36%, 50% y 50% respectivamente, la cosecha a tala rasa se realiza a los 20 años de edad de plantación del rodal. La evaluación de la propuesta arrojó que la producción total de volumen durante el período de conversión es de 779.780 m³, con un flujo de volumen anual de 23.092 m³ y 76.081 m³ para el período 1-14 años y 15-20 años respectivamente, la superficie total a intervenir por el programa es de 2.370 ha.

Gilchrist y Toral (2007), estudian cuatro alternativas de ordenación de la secuencia de cosechas y reforestación para una superficie patrimonial de 1.206 ha de plantaciones de *Eucalyptus globulus*, ubicadas en la Reserva Nacional Lago Peñuelas. Los autores utilizan el modelo estratégico lineal (MELI), diseñado por Gilchrist (2006), en donde las alternativas de ordenación se diferencian por el horizonte de planificación utilizado, 10 años y 20 años, y la determinación arbitraria, por parte de la administración de la Reserva Forestal, de la oportunidad de las intervenciones de cosecha a tala rasa sobre rodales específicos. Los planes de ordenación, que no incorporan exigencias en la oportunidad de intervenciones sobre rodales, evalúan una política de corta de rendimiento constante de volumen en una rotación corta de 10 años y una larga de 20 años, con intervenciones silvícolas de tres claros a las plantaciones con estructura de monte bajo, a la edad de 3 años, 5 años y entre 9-10 años; con la renovación total de los árboles del rodal cuando el 25% de la cepas madres hayan muerto; y cosecha a tala rasa entre los 10 años y 12 años

⁸ Gatica (2003) indica que el modelo de programación lineal formulado y adaptado para la investigación está basado en los modelos de Nautiyal y Pearse (1967), Johnson y Scheurman (1977) y García (1984).

para las plantaciones con estructura de monte bajo y alto. Para el horizonte de planificación de 10 años, los resultados globales indican que el volumen total a cosechar, durante el período de conversión, es de 207.540 m³, con un flujo de volumen anual de 20.754 m³ y una superficie total intervenida por cosecha de 1.162 ha. Por otro lado, la rotación larga de 20 años obtiene una producción total de 271.742 m³, un volumen anual de cosecha de 13.587 m³ y una superficie total cosechada de 1.117 ha.

La presente investigación posee puntos en común con el estudio de Gilchrist y Toral (2007), no así con Gatica (2003), con la cual difiere sustancialmente en los resultados, aunque dicho contraste puede explicarse por las características del método de simulación del comportamiento del rodal y por el modelo matemático de ordenación forestal aplicado en cada estudio. En ninguno de los estudios mencionados se analiza el efecto del plan de ordenación óptimo sobre el patrimonio, bajo los tópicos: aprovechamiento por tipo de estructura forestal y calidad del sitio, regulación del patrimonio al término de la rotación y fragmentación del patrimonio durante la rotación.

7.2.2. Rotación óptima de plantaciones de eucalipto

Usualmente, la determinación de la rotación óptima de las plantaciones forestales se determina a nivel de rodal utilizando el procedimiento de Faustmann (1849). El método consiste en estimar el valor presente neto (VPN) de infinitas rotaciones de una plantación, expresión también denotada como valor potencial del suelo (VPS), y elegir aquella combinación de factores productivos que maximice la rentabilidad⁹ (Díaz-Balteiro, 1997; Bown, 1998; Camelio *et al*, 2005; Díaz-Balteiro y Rodríguez, 2006). En esta línea, Rodríguez y Velilla (2007) estudian la rotación óptima para plantaciones comerciales de clones de *Eucalyptus globulus* en la zona de Mulchén, VIII Región del Bío Bío, Chile, determinando que la maximización del valor potencial del suelo del mejor clon se produce el año 9 de la rotación. Por otro lado, Díaz-Balteiro y Rodríguez (2006) utilizan la técnica de programación dinámica para estimar el valor potencial del suelo de plantaciones de eucalipto en Brasil y España, analizando diferentes calidades de sitio y objetivos de

⁹ La fórmula de Faustmann supone fundamentalmente dos hipótesis: 1° “La plantación forestal se realizará por un número permanente de rotaciones”, 2° “Las utilidades generadas por la plantación se atribuyen solamente al factor de producción tierra” (Gilchrist, 2006).

producción (maderera y de captura de carbono), determinando que la rotación óptima para estas plantaciones varía entre 5-9 años en Brasil y 13-18 años en España.

A nivel de patrimonio, la rotación óptima puede calcularse utilizando simuladores financieros y del comportamiento del bosque para la estimación de los coeficientes económicos del valor presente total del patrimonio¹⁰ (VPT) a ingresar en la función objetivo del modelo de optimización lineal a maximizar, en donde la rotación óptima queda determinada por el período de conversión del plan que maximice el VPT (Buongiorno y Gilles, 2003). En este ámbito, Quiroz (2009) analiza la rotación óptima patrimonial para plantaciones comerciales de *Pinus radiata*, ubicadas en la Cordillera de la Costa de la VII Región del Maule, Chile, concluyendo que la maximización del VPT patrimonial se logra utilizando una rotación común para todos los sitios forestales, y no con una rotación particular a nivel de rodal o de cada sitio. En la presente investigación se recomienda adoptar una rotación patrimonial corta de 10 años para las plantaciones de *Eucalyptus globulus*, con objetivo de producción madera pulpable, aunque no se estudia el efecto de rotaciones particulares para cada calidad del sitio sobre el objetivo estratégico. También, es interesante destacar que los planes de ordenación alternativos que maximizaron algún criterio financiero (VPN, VPS o VPT) y dejaron *ceteris paribus* al resto de los parámetros económicos y de planificación, obtuvieron resultados equivalentes en producción de volumen total y en la ordenación de la secuencia de intervenciones de cosecha y reforestación, sugiriendo que la rotación óptima patrimonial puede determinarse utilizando cualquier indicador financiero incorporado en MELISOFT, si y sólo si, la totalidad del patrimonio queda regulado por superficie al final del horizonte de planificación.

7.3. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

A continuación, son descritos someramente algunos aspectos relevantes a considerar en el desarrollo de una línea de investigación en el ámbito de la planificación forestal basada en métodos analíticos de optimización lineal, utilizando el modelo estratégico lineal (MELI),

¹⁰ Para más detalle referirse al acápite 5.2.2 a evaluación y comparación de planes.

desarrollado por Gilchrist (2006), y el software MELISOFT, construido y validado en el presente estudio. Estos son:

- 1) Permitir anexar y/o excluir unidades de manejo en períodos específicos de un plan de ordenación forestal. El suelo es un factor de producción, y el aumento o reducción de su uso forestal, depende de las políticas que la organización defina y estipule. Evaluar políticas sobre el uso del suelo forestal, utilizando el modelo estratégico lineal (MELI) implementado por MELISOFT, sería un apoyo a la toma de decisiones para definir las directrices generales de planes, programas y proyectos destinados a mejorar el uso sostenible de los bosques bajo criterios de eficiencia.
- 2) Incorporar información de inventarios forestales de las plantaciones coetáneas sobre los atributos de las cepas de un rodal, es decir, especificar por cada unidad de manejo el número de la rotación y las rotaciones máximas a mantener las cepas de una especie. El modelo MELI no incorpora la variable cantidad máxima de rotaciones de la cepa según sea la especie y la calidad del sitio, pudiendo ser un factor importante a considerar en los planes de ordenación de plantaciones coetáneas de especies con elevada capacidad de retoñación, tal como es *Eucalyptus globulus*. La incorporación de este factor, tendría como resultado una planificación precisa y detallada de la secuencia de las intervenciones de reforestaciones y clareos a efectuar en un patrimonio, pudiendo investigar el efecto de las rotaciones de las cepas de una especie forestal específica, ubicadas en diferentes sitios forestales, en la obtención de un resultado óptimo para la gestión del bosque.
- 3) Establecer arbitrariamente la oportunidad de las intervenciones silvícolas en las unidades de manejo a ordenar. Muchas veces el planificador de un patrimonio debe establecer la oportunidad de una intervención silvícola en una unidad de manejo determinada, con el fin de satisfacer necesidades contingentes o bien simplificar la gestión del patrimonio.
- 4) Diversificar y/o combinar objetivos de gestión de la organización. En la actualidad, la gestión del bosque implica la flexibilización de algunas reglas tradicionales de la ordenación forestal, la aplicación de métodos analíticos de optimización para

determinar la secuencia de intervenciones silvícolas que optimicen algún objetivo simple o múltiple de la organización puede estar enfocado desde varias perspectivas. Los objetivos de la ordenación pueden encontrarse en uno o varios vértices del triángulo de la sustentabilidad, es decir, el espacio compartido entre la dimensión económica, social y ambiental. Evaluar el efecto individual y/o combinado de los objetivos de gestión de la organización sobre el uso sostenible del bosque, permitirá predecir escenarios futuros de gestión, y con esto lograr planificar adecuadamente y de forma anticipada los cursos de acción a seguir cuando sean necesario.

- 5) Crear y/o modificar modelos de simulación del comportamiento del bosque que incorporen variables que sean independientes entre si, privilegiando las variables ambientales (sitio) y antrópicas (silvicultura), excluyendo las variables de estado del rodal. Las variables respuesta pueden ser diversas, y serán la base para la estimación precisa de los coeficientes de la función objetivo y de las restricciones de flujo del modelo MELI. Algunos ejemplos de variables respuesta no tradicionales son: producción de carbono, reserva de biodiversidad, generación de productos forestales no maderables, producción de leña y carbón, entre otras
- 6) Desarrollar modelos de ordenación forestal de nivel táctico y operativo coherentes y consistentes con la agregación y desagregación de la información generada por MELI.
- 7) Otorgar una dimensión geográfica a la organización temporal y espacial de los planes de ordenación optimizados con MELI, encadenando el software MELISOFT con sistemas de información geográfica (SIG).
- 8) Crear versiones actualizadas y validadas del software MELISOFT, que integren gradualmente las modificaciones del modelo MELI, encadenando al software con otros programas computacionales de automatización de procesos, como por ejemplo: sistemas de información geográfica, simuladores forestales, sistemas de gestión de inventarios, sistemas de información ambiental, entre otras.

8. CONCLUSIONES

La presente investigación aporta una base conceptual y práctica para el diseño y construcción de tecnologías computacionales de software para el apoyo a la toma de decisiones en la ordenación forestal sustentable de bosques coetáneos, basados en modelos de programación lineal de planificación territorial. Se ha obtenido como resultado una herramienta computacional potente y flexible que permitirá al planificador y/o gestor de un patrimonio forestal contar con información confiable para responder de manera oportuna a algunos problemas complejos de la ingeniería forestal.

Los materiales y métodos utilizados en la investigación fueron idóneos para el cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos de la Memoria de Título. Recalcando que, los avances actuales en materia de tecnologías de información son vertiginosos y acelerados, pudiendo abrir una brecha significativa en la utilización de nuevas metodologías de investigación y materiales más actualizados en las próximas investigaciones a realizar en este campo.

En cuanto al diseño y programación del software MELISOFT 1.0 se concluye que este cumple satisfactoriamente con todos los requisitos de interfaz del usuario, datos de entrada, información de salida, procesos de transformación, almacenamiento de datos, rendimientos y restricciones de desarrollo exigidos, atendiendo en todo momento al correcto diseño de la estructura de datos, la arquitectura del software, la interfaz gráfica del usuario y el detalle procedimental, la cual traducida en código al lenguaje de programación Visual Basic 6.0, permitió la compilación y empaquetado del software con el fin de facilitar su posterior distribución.

La validación del software con un caso real de ordenación forestal de plantaciones coetáneas de *Eucalyptus globulus* pertenecientes a la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V Región de Valparaíso (Chile) arroja las siguientes conclusiones:

- De los 48 planes de ordenación alternativo procesados, sólo el Plan 7 cumple con el objetivo estratégico de maximizar el valor total del patrimonio y minimizar la superficie no regulada al término de la rotación, con una producción de volumen de madera máxima y constante de 22.510 m³ssc/año y una superficie anual de cosecha

equivalente a 120 ha, interviniendo sólo macro-rodiales con edad igual o superior a 10 años, durante un período de conversión de 10 años, obteniendo un valor total del patrimonio (VPT) de 3.786,8 millones de pesos, asumiendo como parámetros económico: precio de producto = 14.000 \$/m³ssc, costo de reforestación = 415.000 \$/ha, tasa de descuento = 7%.

- Durante el período de conversión del Plan 7 la totalidad de la superficie de plantaciones con estructura de monte alto será transformada a monte bajo, dado que el modelo matemático privilegia la asignación de superficie a cosechar a los macro-rodiales con estructura de monte alto, ya que estos presentan mayor edad de plantación y aportan un mayor volumen por unidad de superficie.
- La reducción en existencias de superficie y volumen, durante el período del conversión del Plan 7, es significativamente mayor en las plantaciones con calidad de sitio media (IS₂₀ = 31,7 m), no así para aquellas con calidad de sitio buena (IS₂₀ = 37,7 m) y baja (IS₂₀ = 25,5 m).
- El Plan 7 reguló todas las edades del bosque en tramos de igual superficie de 120 ha al término del período de conversión, aunque los tramos no son equi-productivos en el período de post-conversión.
- Para cumplir el objetivo estratégico del Plan 7 es necesario fragmentar los macro-rodiales del patrimonio.
- En términos generales, se recomienda manejar las plantaciones de *Eucalyptus globulus* con una rotación patrimonial corta de 10 años, aplicando una silvicultura más intensiva en los sitios de mejor calidad durante el primer decenio de la plantación.

Se determinó que la inclusión del software MELISOFT 1.0 en la metodología de resolución del problema de ingeniería minimizo sustancialmente el tiempo de respuesta en la búsqueda de una solución óptima. Además, facilitó el ingreso ordenado y sistemático de la información básica al sistema.

Por último, existe una fuerte convicción en la masificación acelerada del uso de tecnologías de información en el ámbito del manejo de los recursos naturales, por ende, un paso lógico que permita desarrollar una línea de investigación es la creación de un sistema computacional automático e integrado, para el apoyo a la toma de decisiones en todos los niveles de la gestión forestal.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ARMITAGE, I. 1999. Directrices para la ordenación de los bosques tropicales, 1. Producción de madera. Estudio FAO Montes N° 135. Roma. Italia. Pp 330.
- BLUTH, A. 2002. Chile, País Forestal: Una Realidad que se Consolida. Editado por la Corporación Chilena de la Madera A.G. Santiago. Chile. 200 pp.
- BOWN, H. 1998. Selección y evaluación técnico financiera de regímenes silviculturales para *Pinus radiata*. Documento técnico N° 122, Chile Forestal. Santiago, Chile.
- BOWN, H. Ordenación y Producción Forestal. En: HERNÁNDEZ, J., DE LA MAZA, C. y ESTADES, C. (Editores). Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales. Santiago, Editorial Universitaria, 2007. pp. 453-507.
- BUONGIORNO, J. y GILLES, J.K. 2003. Decision Methods for Forest Resource Management. Academic Press, California, USA. 439 p.
- CAMELIO, M.E.; TORAL, M.; VALDÉS, S. 2005. Evaluación de plantaciones y simulador financiero: caso de estudio. En: TORAL, M., GONZÁLEZ, L. y GARFIAS, R. (Editores). Secuoya: Nueva opción, productos y mercados para el sur de Chile, 2005. pp. 175-186.
- CARTES, F.; CONTRERAS, E.; CRUZ, J.M. 2007. La tasa social de descuento en Chile. [en línea] < http://200.89.70.78:8080/jspui/bitstream/2250/10703/1/Cartes_Fernando.pdf > [consultada: 11 de enero de 2010].
- CHURCH, R. Chapter 17: Tactical-Level Forest Management Models, Bridging Between Strategic and Operational Problems. En: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORN DAL, T.; EPSTEIN, R. (Editores). Handbook of Operations Research in Natural Resources. Editorial Springer US, 2007. Pp. 343 – 363.
- CONAF-CONAMA. 1999. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Informe Nacional con Variables Ambientales. Santiago. Chile. 89 pp.

- CURTIS, F. H. 1962. Linear programming the management of a forest property. *Journal of Forestry*. (September): 611-616.
- DÍAZ-BALTEIRO, L. 1997. Turno forestal económicamente óptimo: una revisión. *Economía Agraria* 180:181-224.
- DÍAZ-BALTEIRO, L. y RODRÍGUEZ, L. 2006. Optimal rotations on *Eucalytus* plantation including carbon sequestration: a comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management* 229: 247-258.
- DOBBS, T. y MAXWELL, A. 2002. Development of a Forest Estate Management Modelling Program. Management Science Honours Project. [En línea] <<http://www.mang.canterbury.ac.nz/courseinfo/msci/msci480/>> [Consulta: 20 de Mayo de 2010].
- EPSTEIN, R., MORALES, R., SERÓN, J., WEINTRAUB, A. 1999. Use of OR Systems in the Chilean Forest Industries. *Interfaces* (1) 29:7–29.
- EPSTEIN, R.; KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Chapter 18: Harvest Operational Models in Forestry. En: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORN DAL, T.; EPSTEIN, R. (Editores). *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Editorial Springer US, 2007. Pp. 365 – 377.
- FAO. 2006. Promoción de la ordenación sostenible de bosques y terrenos boscosos. [En línea] <<http://www.fao.org/forestry/site/3861/es/>> [Consulta: 20 de Enero de 2007].
- GARCÍA, O. 1984. FOLPI, A forestry – oriented linear programming interpreter. Proceedings IUFRO Symposium on Forest Management planning and managerial economics. University of Tokyo. Japan. 293 – 305 Pp.
- GATICA, P. 2003. Propuesta de un programa de intervenciones en rodales de *Eucalyptus globulus* en la Reserva Nacional Lago Peñuelas. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 52 p.

- GELDRES, E.; SCHLATTER, J.; MARCOLETA, A. 2004. Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. *Bosque* 25(3)57-62.
- GERDING, V. 1991. Manejo de las Plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 12(2):3-10.
- GILCHRIST, A. 1978. Management of even – aged forest stands. A mathematical approach. Tesis (Ph. D). Bangor, United Kingdom. U.C.N.W, Department of Forestry and Wood Science, 1978. 209p.
- GILCHRIST, J. Manejo Forestal I. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Recursos Forestales. Santiago, 2006. 308p.
- GILCHRIST, J. Y TORAL, M. 2007. Plan de Ordenación Reserva Nacional Lago Peñuelas. Sin publicar.
- GUNN, E. Chapter 16: Models for Strategic Forest Management, Informed by Strategic Perspectives. En: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJORNDAL, T.; EPSTEIN, R. (Editores). *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Editorial Springer US, 2007. Pp. 317 – 341.
- HARTWIG, F. 1994. *La tierra que recuperamos*. Editorial Los Andes. Santiago. Chile. 256p.
- GILI VON CHRISMAR, R. 1999. Desarrollo de un software para la regulación de bosques coetáneos con fines docentes. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 93 p.
- INFOR. 2008. Anuario Forestal 2008. Boletín Estadístico 121.
- JOHNSON, K.N. y SCHEURMAN, H.L. 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives - Discussion and Synthesis Monograph No 18. Forest Science.

- KATZ, J; STUMPO, G; VARELA, F. 2000. El Complejo Forestal Chileno. Proyecto CEPAL/CIID CAN 97/S25. Reestructuración industrial, innovación y competitividad internacional en América Latina, Fase II. Santiago. Chile. 100 pp.
- LOUCKS, D. P. 1964. The development of an optimal program for sustained-yield management. *Journal of Forestry* 62: 485-490.
- MADRIGAL, A. 1994. Ordenación de Montes Arbolados. Colección Técnica ICONA. Madrid, España. 375 pp.
- MANOSALVA, D. 2004. Estudio del proceso de Certificación Ambiental en las empresas chilenas. Década 1992-2002. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 114 p.
- MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN. 2009. Precios sociales para la evaluación social de proyectos. [en línea] < http://sni.mideplan.cl/postulacion_links/4_precios_sociales_2010.pdf > [consultada: 11 de enero de 2010].
- MORALES, R. y WEINTRAUB, A. 1989. El enfoque jerárquico en la planificación forestal. En: Actas II Taller de Producción Forestal: noviembre de 1989. Concepción, Chile, Fundación Chile. pp. 1-9.
- MORALES, R., WEINTRAUB, A., OLIVARES, B. y PETERS, R. Modelo para el manejo de plantaciones de pino insigne. FO:DP/CHI/76/003. Documento de trabajo N° 36. Santiago, Chile, 1981. 166p.
- NAUTIYAL, J.C. y PEARSE, P. H. 1967. Optimizing the conversion to sustained yield - A programming solution. *Forest Science* 13(2): 131-139.
- PERALTA, M. 1971. Suelos de regiones naturales de conservación. Boletín técnico N° 24. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. 73 p.
- PRADO J. A. Y BARROS S. 1991. Eucalyptus. Principios de Silvicultura y Manejo. INFOR - CORFO. 199 pp.

- PRESSMAN, R. 2002. Ingeniería del Software, un enfoque práctico. 5ª edición. Madrid, McGraw-Hill. pp. 601.
- PROCHILE. 2008. Servicios, preguntas frecuentes. [En línea] <<http://www.prochile.cl/servicios/faq/respuesta.php?iditem=41&idpregunta=1#F>> [Consulta: 20 de Enero de 2007].
- QUIROZ, A. 2009. Propuesta de un método para maximizar financieramente el rendimiento de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don de un conjunto de sitios, bajo una rotación común. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Santiago. Chile. 67 p.
- RASINMÄKI, J.; MÄKINEN, A.; KALLIOVIRTA, J. 2009. SIMO: An adaptable simulation framework for multiscale forest resource data. *Computers and Electronics in Agriculture* 66: 76–84.
- REYNOLDS, M. y SCHMOLDT, D. 2006. Chapter 8: Computer – Aided Decision Making. En: SHAO, G. y REYNOLDS, M. (Editores). *Computer Applications in Sustainable Forest Management: Including Perspectives on Collaboration and integration*. Netherlands, Editorial Springer. pp. 143–169.
- RODRÍGUEZ, J. y VELILLA, E. 2007. Growth and economics analysis of a *Eucalyptus globulus* clonal spacing trial in Chile. Australian Forest Genetics Conference Breeding for Wood Quality. Hobart, Tasmania. Australia. 17 p.
- RÖNNQVIST, M. 2003. Optimization in forestry. *Mathematical Programming*, Serie B. 97(1-2):267-284.
- SHAO, G. y REYNOLDS, M. 2006. Chapter 1: Introduction: Digital Forestry. En: SHAO, G. y REYNOLDS, M. (Editores). *Computer Applications in Sustainable Forest Management: Including Perspectives on Collaboration and integration*. Netherlands, Editorial Springer. pp. 3–16.

- SIITONEN, M., ANOLA-PUKKILA, A., HAARA, A., HÄRKÖNEN, K., REDSVEN, V., SALMINEN, O. y SUOKAS, A. 2001. MELA Handbook, 2000 Edition. Finnish Forest Research Institute. pp. 492.
- SOTOMAYOR, A.; HELMKE, E.; GARCÍA, E. 2002. Manejo y Mantenición de Plantaciones Forestales. *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.* Documento de divulgación N° 23. INFOR. 51 p.
- USDA FOREST SERVICES. 2005. Spectrum Overview. [En línea] <http://www.fs.fed.us/institute/planning_center/files/Spectrum26_Overview.pdf> [Consulta: 20 de Noviembre de 2009].
- VANCLAY, J. Modelling Forest Growth and Yield, Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International. Wallingford. United Kingdom, 1994. 312p.
- WEINTRAUB, A.; EPSTEIN, R.; MURPHY, G.; MANLEY, B. 2000. The impact of environmental constraints on short term harvesting: Use of planning tools and mathematical models. *Annals of Operations Research* 95: 41-66.

10. ANEXOS

Anexo I. Estimación y proyección de rendimientos volumétricos

Rendimientos volumétricos del bosque viejo

Las funciones de volumen para el bosque viejo, con estructura de monte alto y monte bajo, que permitieron obtener la estimación del volumen en pie hacia el año 2008 son:

$$V_{BV} = -10,3349 + 0,5349 * H * E - 0,00566 * H * E^2 \quad \text{Monte alto}$$

$$V_{BV} = 9,6447 + 0,4183 * H * E - 0,0119 * H * E^2 \quad \text{Monte bajo}$$

Donde,

V_{BV} = volumen de madera en pie del macro-rodal de bosque viejo (m^3 ssc/ha)

H = altura dominante del macro-rodal (m)

E = edad del macro-rodal en el año 2008 (años)

Para calcular la altura dominante (H) del macro-rodal se utilizó la siguiente fórmula

$$H = 7.7263 + 12.1175 \text{ Ln } (E) - 6.1631 * S$$

Donde,

S = calidad del sitio del macro-rodal (S=1 calidad buena, S=2 calidad media, S=3 calidad baja)

La proyección de rendimientos volumétricos de los macro-rodales del bosque viejo está dada por la estimación del volumen en pie para el año 2008 y el incremento volumétrico anual de la plantación, considerando las cortas intermedias de claros. Las funciones de incremento volumétrico anual, por tipo de estructura, son:

$$IV_{BV} = 0,78497 + 0,03158 * H * E - 0,0006679 * H * E^2 \quad \text{Monte alto}$$

$$IV_{BV} = 7,6516 - 0,004181 * H * E - 0,0000085705 * E^2 \quad \text{Monte bajo}$$

Donde,

IV_{BV} = incremento volumétrico anual del macro-rodal de bosque viejo (m^3 ssc/ha/año)

Rendimientos volumétricos del bosque nuevo

Tal como se explicó anteriormente, el bosque nuevo es generado a partir de las cosechas a tala rasa del bosque viejo, la estructura de estos macro-rodales es de monte bajo-regular y la función del volumen en pie es:

$$V_{BN} = 9,6447 + 0,4183 * E * H - 0,0119 * H * E^2$$

Donde,

V_{BN} = volumen de madera en pie del macro-rodal de bosque nuevo (m^3 ssc/ha)

H = altura dominante del macro-rodal (H)

E = edad del macro-rodal (años)

La proyección de rendimientos volumétricos de los macro-rodales de bosque nuevo se inició con la estimación del volumen en pie a la edad de plantación de un año más las sucesivas estimaciones de incremento volumétrico anual. La función de incremento volumétrico anual para macro-rodales de bosque nuevo, con estructura de monte bajo, es:

$$IV_{BN} = 7,69546 + 0,023297 * H * E - 0,001221 * H * E^2$$

Donde,

IV_{BN} = incremento volumétrico anual del macro-rodal de bosque nuevo (m^3 ssc/ha/año)

Para la proyección de los incrementos volumétricos de los macro-rodales con edades superiores o iguales a 45 años, pertenecientes al bosque viejo y nuevo, se asumió un valor conservador y constante de $2 m^3$ ssc/ha/año, debido a que las funciones disponibles y utilizadas para dicho efecto, determinan a esa edad un rendimiento decreciente.

11. APÉNDICES

Apéndice I. Formulación general del Modelo Estratégico Lineal (MELI).

El Modelo Estratégico Lineal (MELI) es un modelo de programación lineal, que permite ordenar la secuencia de intervenciones de cosecha-reforestación y/o de raleos sobre un patrimonio forestal, incluyendo diferentes calidades de sitio y estructura de la masa forestal. La base conceptual de esta formulación se encuentra en las publicaciones de Gilchrist (2006), Gilchrist y Toral (2007) y Quiroz (2009).

La formulación general comprende la ordenación forestal de un patrimonio, durante período de conversión de n períodos, de la secuencia de intervenciones silvícolas de cosechas y/o raleos, en rodales distribuidos en p clases de edad de plantación, ubicados en q calidades de sitio, con r estructuras de la masa forestal.

Para comprender MELI, es necesario clasificar el bosque del patrimonio a modelar, según sea la oportunidad de la reforestación durante el período de conversión, en bosque viejo y bosque nuevo. El bosque viejo, está integrado por todos aquellos rodales que inician la planificación, por lo tanto han sido forestados o reforestados antes del período de conversión; las porciones residuales de éstos, generadas por las sucesivas intervenciones silvícolas de cosecha durante el período de conversión, también pertenecen a la clasificación de bosque viejo. El bosque nuevo, agrega toda la superficie que ha sido cosechada y reforestada inmediatamente en el bosque viejo, durante el período de conversión.

Variables de decisión

MELI utiliza dos tipos de variables de decisión, las cuales son:

X_{ijkl} = “Superficie a cosechar y reforestar inmediatamente en el i -ésimo año del período de conversión, en un bosque nuevo o viejo perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”

R_{ijkl} = “Superficie a ralear en el i -ésimo año del período de conversión, en un bosque nuevo o viejo perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”

Donde los subíndices;

| | | | |
|-----|---|---------------|--|
| i | = | $1, \dots, n$ | identificador del año del período de conversión |
| j | = | $1, \dots, p$ | identificador de la clase de edad de plantación del bosque |
| k | = | $1, \dots, q$ | identificador de la calidad del sitio |
| l | = | $1, \dots, r$ | identificador del tipo de estructura del bosque |

Si $i \leq j$ entonces la variable corresponde a bosque viejo. Por otro lado, si $i > j$ la variable corresponde a bosque nuevo.

Parámetros de planificación

S_{ijkl} = “Existencia inicial en superficie (en ha) de un bosque viejo perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”

$Edmin$ = “Edad mínima de intervención silvícola, de cosecha y/o raleo, del bosque nuevo y viejo (en años)”

CC = “Ciclo de corta de intervenciones silvícolas de raleo (en años), en bosque nuevo y viejo”

HP = “Horizonte de planificación del plan de ordenación alternativo (en años), donde $HP = n$ ”

CEI_k = “Vector de k dimensiones, que almacena la cantidad de clases de edad de plantación máxima, al inicio del período de conversión, en la calidad de sitio k , donde $p = CEI_k$ ”.

$TRANS_l$ = “Tipo de estructura de la masa forestal l a la cual es transferida la superficie cosechada y reforestada inmediatamente de bosque viejo, durante el período de conversión”

β = “Tasa de regulación anual del flujo a regular (en número decimal)”

Parámetros económicos

PR = “Precio unitario del producto maderable (en miles \$ / m³ ssc)”

$CREF$ = “Costo de reforestación por hectárea (en miles \$ / ha)”

α = “Tasa de descuento del flujo financiero (en número decimal)”

Coefficientes tecnológicos de volumen

$RCOS_{jkl}$ = “Rendimiento volumétrico (en m³ ssc / ha) de un bosque nuevo o viejo cosechado, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”

$RRAL_{jkl}$ = “Rendimiento volumétrico (en m³ ssc / ha) de un bosque nuevo o viejo raleado, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”

Coefficientes tecnológicos financieros

VPN_{ijkl}^{COS} = “Rendimiento del valor presente neto (en miles \$ / ha) de un bosque nuevo o viejo, cosechado en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”, donde:

$$VPN_{ijkl}^{COS} = \frac{PR \times RCOS_{jkl} - CREF}{(1 + \alpha)^i}$$

VPN_{ijkl}^{RAL} = “Rendimiento del valor presente neto (en miles \$ / ha) de un bosque nuevo o viejo, raleado en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”, donde:

$$VPN_{ijkl}^{RAL} = \frac{PR \times RRAL_{jkl} - CREF}{(1 + \alpha)^i}$$

VPS_{ijkl}^{COS} = “Rendimiento del valor potencial del patrimonio actualizado (en miles \$ / ha) de un bosque nuevo o viejo, cosechado en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”, donde:

$$VPS_{ijkl}^{COS} = \frac{VPN_{ijkl}^{COS}}{(1 + \alpha)^i \left[(1 + \alpha)^{HP} - 1 \right]}$$

VPS_{ijkl}^{RAL} = “Rendimiento del valor potencial del patrimonio actualizado (en miles \$ / ha) de un bosque nuevo o viejo, raleado en el i -ésimo año del período de conversión,

perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”, donde:

$$VPS_{ijkl}^{RAL} = \frac{VPN_{ijkl}^{RAL}}{(1 + \alpha)^i \left[(1 + \alpha)^{HP} - 1 \right]}$$

VPT_{ijkl}^{COS} = “Rendimiento del valor presente total (en miles \$ / ha) de un bosque nuevo o viejo, cosechado en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”, donde:

$$VPT_{ijkl}^{COS} = VPN_{ijkl}^{COS} + VPS_{ijkl}^{COS}$$

VPT_{ijkl}^{RAL} = “Rendimiento del valor presente total (en miles \$ / ha) de un bosque nuevo o viejo, raleado en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal”, donde:

$$VPT_{ijkl}^{RAL} = VPN_{ijkl}^{RAL} + VPS_{ijkl}^{RAL}$$

Parámetros binarios del modelo

f = ”Parámetro binario que activa ($f=1$) o desactiva ($f=0$) el límite inferior del período de conversión, en la cual el bosque viejo es susceptible de ser intervenido por cosecha y reforestación inmediata, por limitaciones de la edad mínima de intervención”. Es utilizada en las restricciones estructurales de bosque viejo.

e = ”Parámetro binario que activa ($e=1$) o desactiva ($e=0$) el límite inferior del período de conversión, en la cual el bosque viejo está disponible para ser intervenido por cosecha y reforestación inmediata, por limitaciones de la edad mínima de intervención”. Es utilizada en las restricciones estructurales de superficie disponible para cosechar y ralear en bosque viejo.

g = ”Parámetros binario que activa ($g=1$) o desactiva ($g=0$) el límite inferior de las clases de edad de plantación del bosque viejo, susceptible de ser intervenido por cosecha y reforestación inmediata durante el período de conversión, por limitaciones de la edad mínima de intervención”. Es utilizada en las restricciones estructurales de bosque viejo y bosque nuevo.

$v =$ "Parámetro binario que activa ($v=1$) o desactiva ($v=0$) el límite inferior de las clases de edad de plantación del bosque viejo que generarán la existencia en superficie de bosque nuevo en una determinada clase de edad, al final del período de conversión, por limitaciones de la edad mínima de intervención". Es utilizada en las restricciones estructurales de bosque nuevo y de superficie disponible para cosechar y ralea en bosque nuevo.

$m =$ "Parámetro binario que activa ($m=1$) o desactiva ($m=0$) el descuento de superficies cosechadas y reforestada inmediatamente, durante el período de conversión, a la existencia en superficie de un bosque nuevo, perteneciente a una determinada clase de edad de plantación, al término del período de conversión, por limitaciones de la edad mínima de intervención". Es utilizada en las restricciones estructurales de bosque nuevo.

$w =$ "Parámetro binario que activa ($w=1$) o desactiva ($w=0$) el descuento de clases de edad de bosque nuevo generadas durante el período de conversión, por limitaciones de la edad mínima de intervención de cosecha y reforestación inmediata en bosque viejo". Es utilizada en las restricciones estructurales de bosque nuevo y de superficie disponible para cosechar y ralea en bosque nuevo; también, en las restricciones de gestión de regulación del flujo anual, de algún indicador de volumen o financiero.

$t_{jkl} =$ "Matriz de $j \times k \times l$ dimensiones, que almacena los parámetros binarios que activan ($t_{jkl}=1$) o desactivan ($t_{jkl}=0$) la superficie inicial de bosque viejo, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa, que será regulada al término del período de conversión, por limitaciones de la edad mínima de intervención". Es utilizada en las restricciones estructurales de bosque nuevo.

$y_{ijkl} =$ "Matriz de $i \times j \times k \times l$ dimensiones, que almacena los parámetros binarios que activan ($y_{ijkl}=1$) o desactivan ($y_{ijkl}=0$) la superficie cosechada y reforestada inmediatamente (X_{ijkl}) de bosque viejo ($i \leq j$) y/o de bosque nuevo ($i > j$), en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa, que integrará a la existencia en superficie de un bosque nuevo, perteneciente a una

determinada clase de edad de plantación, al término del período de conversión, por limitaciones de la edad mínima de intervención”. Se utiliza en la función objetivo; en las restricciones estructurales de bosque nuevo y de superficie disponible para cosechar y ralea en bosque nuevo; y en las restricciones de gestión de regulación del flujo anual, de algún indicador de volumen o financiero.

Activación de los parámetros binarios de cosecha del modelo

Dado que la matriz y_{ijkl} , almacena la información acerca de las variables X_{ijkl} que están activas en el modelo matemático, el procedimiento para asignarles valor al parámetro binario $y_{ijkl}=1$, es el siguiente:

- 1) Variables X_{ijkl} de Bosque Viejo ($i \leq j$): para todas las superficies iniciales de bosque viejo $S_{1j'k'l'} > 0$, perteneciente a la j' -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k' -ésima calidad de sitio, con l' -ésima estructura de la masa, proyectadas a lo largo del período de conversión n , con limitaciones de edad de intervención $Edmin$, se tiene que:

$$y_{i(j'+i-1)kl} = 1$$

$$\forall j', k', l' \in S_{1j'k'l'} > 0; \forall i \leq j$$

$$j' \geq Edmin \wedge j \in \{j', \dots, j' + n - 1\} \Rightarrow \forall i = 1, \dots, n; \forall k = k'; \forall l = l'$$

$$j' < Edmin \wedge j \in \{Edmin, \dots, j' + n - 1\} \Rightarrow \forall i = Edmin - j' + 1, \dots, n; \forall k = k'; \forall l = l'$$

- 2) Variables X_{ijkl} de Bosque Nuevo ($i > j$): para todas las existencias en superficie de bosque nuevo generadas en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, transferida a la estructura de la masa $TRANS_l$, con limitaciones de edad de intervención $Edmin$, se tiene que:

$$y_{ijkl} = 1$$

$$\forall i > j \wedge j \geq Edmin$$

$$CEI_k \geq Edmin \Rightarrow \forall i = Edmin + 1, \dots, n; \forall j = Edmin, \dots, i - 1; k \in \{1, \dots, q\}; l = Trans_l \in \{1, \dots, r\}$$

$$CEI_k < Edmin \Rightarrow \forall i = 1 + 2Edmin - CEI_k, \dots, n; \forall j = Edmin, \dots, i + CEI_k - Edmin - 1$$

$$k \in \{1, \dots, q\}; l = Trans_l \in \{1, \dots, r\}$$

Cantidad total de variables del modelo

Dado que la matriz y_{ijkl} , almacena la información acerca de las variables X_{ijkl} que están activas en el modelo matemático, el total de éstas puede ser cuantificado de la siguiente manera:

$$\text{Cantidad de variables } X_{ijkl} = \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^q \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+n-1} \sum_{i=1}^n y_{ijkl}$$

Si existe la oportunidad de cosechar una superficie de bosque nuevo o viejo X_{ijkl} , en el i -ésimo año del período de conversión, perteneciente a la j -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la k -ésima calidad de sitio, con l -ésima estructura de la masa forestal, también existe la oportunidad de ralear una superficie R_{ijkl} . Por lo tanto, para cuantificar el número de variables del modelo, X_{ijkl} y R_{ijkl} , se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Cantidad de variables } X_{ijkl} \text{ y } R_{ijkl} = 2 \times \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^q \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+n-1} \sum_{i=1}^n y_{ijkl}$$

Función objetivo

Se han formulado cuatro funciones objetivos diferentes en MELI, cada una con un objetivo simple a maximizar en un plan de ordenación alternativo. El tomador de decisiones, sólo debe seleccionar una función objetivo, ya sea maximización del volumen (VOL), del valor presente neto (VPN), del valor potencial del suelo (VPS) o del valor presente total (VPT), por intervenciones de cosechas (X_{ijkl}) y/o raleos (R_{ijkl}), en un patrimonio conformado por bosques viejos ($i \leq j$) y/o nuevos ($i > j$), ubicados en q calidades de sitio (k), con r estructuras de la masa forestal (l) y con limitaciones de edad mínima de intervención ($Edmin$), durante el período de conversión (n). Estas son:

- 1) Max VOL = “Maximización del volumen, obtenido por intervenciones de cosecha y/o raleo en el patrimonio forestal, durante el período de conversión”

$$\text{Max} \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^q \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+n-1} \sum_{i=1}^n y_{ijkl} \times (RCOS_{jkl} \times X_{ijkl} + RRAL_{jkl} \times R_{ijkl})$$

- 2) Max VPN = “Maximización del valor presente neto, obtenido por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio forestal, durante el período de conversión”

$$Max \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^q \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+n-1} \sum_{i=1}^n y_{ijkl} \times (VPN_{ijkl}^{COS} \times X_{ijkl} + VPN_{ijkl}^{RAL} \times R_{ijkl})$$

- 3) Max VPS = “Maximización del valor potencial del suelo, obtenido por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio forestal, durante el período de conversión”

$$Max \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^q \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+n-1} \sum_{i=1}^n y_{ijkl} \times (VPS_{ijkl}^{COS} \times X_{ijkl} + VPS_{ijkl}^{RAL} \times R_{ijkl})$$

- 4) Max VPT = “Maximización del valor presente total del patrimonio, obtenido por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio forestal, durante el período de conversión”

$$Max \sum_{l=1}^r \sum_{k=1}^q \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+n-1} \sum_{i=1}^n y_{ijkl} \times (VPT_{ijkl}^{COS} \times X_{ijkl} + VPT_{ijkl}^{RAL} \times R_{ijkl})$$

Restricciones estructurales

- 1) Restricciones de Bosque Viejo: la sumatoria de las superficies cosechadas en cada bosque viejo ($i \leq j$) durante el período de conversión, ubicado en la calidad de sitio k' , con estructura de la masa forestal l' , debe ser menor o igual a la superficie inicial $S_{1jk'l'}$ de éste. Existen tantas restricciones como bosques viejos ($i \leq j$) al inicio del período de conversión, pertenecientes a CEI_k clases de edad de plantación (j), ubicado en q calidades de sitio (k), con r estructuras de la masa forestal (l), con al menos una oportunidad de intervención silvícola de cosecha, durante el período de conversión.

$$\sum_{i=1+f \times (Edmin-j)}^n X_{i(i+j-1)k'l'} \leq S_{1jk'l'}$$

$$\forall j = 1 + g \times (Edmin - n), \dots, CEI_k.$$

La asignación de los valores de las variables binarias de la expresión, están sujetas a las siguientes condiciones:

$$f = \begin{cases} 1 & \text{Si } j < Edmin \\ 0 & \text{Si } j \geq Edmin \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} 1 & \text{Si } Edmin \geq n+1 \\ 0 & \text{Si } Edmin < n+1 \end{cases}$$

Si $j \geq Edmin$, entonces, el operador lógico de la restricción cambia a igualdad (=).

- 2) Restricciones de Bosque Nuevo: al término del período de conversión, la superficie patrimonial de bosque nuevo ($i > j$), perteneciente a todas las calidades de sitio ($k = 1, \dots, q$) y estructuras de la masa forestal ($l = 1, \dots, r$), debe distribuirse en $n - (Edmin - Max(CEI_k)) \times w$ clases de edad de plantación (CE), donde n es la cantidad de períodos del horizonte de planificación, $Edmin$ es la edad mínima de intervención del bosque, $Max(CEI_k)$ es la cantidad máxima de clases de edad de plantación al iniciar el período de conversión, en cualquier calidad de sitio k del patrimonio y w es un parámetro binario que toma el valor, $w = 0$ si $Max(CEI_k) \geq Edmin$ ó $w = 1$ si $Max(CEI_k) < Edmin$. Cada clase de edad de plantación de bosque nuevo (CE) debe acotarse a una superficie menor o igual al cuociente entre la superficie total del patrimonio y la cantidad de clases de edad de bosque nuevo (CE) que hayan sido generadas durante el período de conversión debido a las intervenciones silvícolas de cosecha y reforestación inmediata en el bosque viejo. Existen tantas restricciones como clases de edad de plantación de bosque nuevo (CE) generadas en el período de conversión.

$$m \times \sum_{j=Edmin}^{CE-1} \sum_{k=1}^q \sum_{l=TRANS_l}^{TRANS_l} X_{(j+n-CE+1)jkl} \leq \frac{\sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r \sum_{j=1+g \times (Edmin-n)}^{CEI_k} t_{jkl} \times S_{ljk}}{n - w \times (Edmin - Max(CEI_k))}$$

$$\forall CE = 1, \dots, n - w \times (Edmin - Max(CEI_k))$$

Donde:

$$CEI_k = (CEI_1, \dots, CEI_q)$$

$$TRANS_l \in \{1, \dots, r\}$$

$$t_{jkl} = (t_{111}, \dots, t_{pqr})$$

$$y_{(n-CE+1)jkl} = (y_{1111}, \dots, y_{(n-CE+1)(CEI_q+n-1)qr})$$

Las condiciones necesarias para que existan estas restricciones son:

$$CEI_k + n + CE \geq Edmin \Rightarrow \exists X_{(n-CE+1)jkl} \in X_{ijkl}$$

$$CE - 1 \geq Edmin \Rightarrow \exists X_{(j+n-CE+1)jkl} \in X_{ijkl}$$

La asignación de los parámetros binarios de la expresión, están sujetas a las siguientes condiciones:

$$v = \begin{cases} 1 & \text{Si } Edmin < n - CE + 1 \\ 0 & \text{Si } Edmin \geq n - CE + 1 \vee Edmin \leq n - w \times (Edmin - Max(CEI_k)) \end{cases}$$

$$m = \begin{cases} 1 & \text{Si } CE - 1 \geq Edmin \\ 0 & \text{Si } CE - 1 < Edmin \end{cases}$$

$$g = \begin{cases} 1 & \text{Si } Edmin \geq n + 1 \\ 0 & \text{Si } Edmin < n + 1 \end{cases}$$

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } Max(CEI_k) < Edmin \\ 0 & \text{Si } Max(CEI_k) \geq Edmin \end{cases}$$

$$t_{jkl} = \begin{cases} 1 & \text{Si } 1 + g \times (Edmin - n) \leq CEI_k \wedge S_{ijkl} > 0 \\ 0 & \text{Si } 1 + g \times (Edmin - n) > CEI_k \vee S_{ijkl} = 0 \end{cases}$$

Si $Edmin = 1$, entonces, el operador lógico de las restricciones cambia a igualdad (=).

- 3) Restricciones de superficie disponible para cosechar en bosque viejo ($I \leq J$): la superficie a intervenir con cosecha y reforestación inmediata en el I -ésimo año del período de conversión, en un bosque viejo con clase de edad de plantación J , ubicado en la K -ésima calidad de sitio, con L -ésima estructura de la masa forestal, debe ser menor o igual a la existencia en superficie de este. Existen tantas restricciones como variables de decisión X_{ijkl} , para bosque viejo, a considerar en el modelo.

$$\sum_{i=1+e \times (Edmin - (J-I) - 1)}^I X_{i(i+J-I)KL} \leq S_{1(J-I)KL}$$

$$\forall y_{IJKL} = 1; J \geq I$$

La asignación de los valores del parámetro binario de la expresión, está sujeta a la siguiente condición:

$$e = \begin{cases} 1 & \text{Si } J - I < Edmin \\ 0 & \text{Si } J - I \geq Edmin \end{cases}$$

- 4) Restricciones de superficie disponible para cosechar en bosque nuevo ($I > J$): la superficie a intervenir con cosecha y reforestación inmediata en el I -ésimo año del período de conversión, en un bosque nuevo con clase de edad de plantación J , ubicado en la K -ésima calidad de sitio, con L -ésima estructura de la masa forestal, debe ser menor o igual a la existencia en superficie de este. Existen tantas restricciones como variables de decisión X_{ijkl} , para bosque nuevo, a considerar en el modelo.

$$\sum_{j=Edmin}^J X_{(j+I-J)jKL} - \sum_{l=1}^r \sum_{j=Edmin+v \times (I-J-Edmin)}^{CEI_K^{-1+I-J}} y_{(I-J)jKL} \times X_{(I-J)jKL} \leq 0$$

$$\forall y_{ijkl} = 1; J < I \wedge J \geq Edmin$$

La asignación de los valores de los parámetros binarios de la expresión, están sujetas a las siguientes condiciones:

$$v = \begin{cases} 1 & \text{Si } Edmin < I - J \\ 0 & \text{Si } Edmin \geq I - J \vee Edmin \geq I - w \times (Edmin - CEI_K) \end{cases}$$

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } CEI_K < Edmin \\ 0 & \text{Si } CEI_K \geq Edmin \end{cases}$$

- 5) Restricciones de superficie disponible para raleos en bosque viejo ($I \leq J$): la superficie a intervenir con raleo en el I -ésimo año del período de conversión, a un bosque viejo perteneciente a la J -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la K -ésima calidad de sitio, con L -ésima estructura de la masa forestal, debe ser menor o igual a la existencia en superficie de este. Cada superficie de raleo, R_{ijkl} , pertenece a un ciclo de corta (CC), y éste comienza en el año de la rotación $i = 1 + e \times (Edmin - (J - I) - 1)$, en el cual el bosque viejo se encuentra en una clase de edad de plantación igual o superior a la edad mínima de intervención ($Edmin$). Cuando el ciclo de corta es superior a un año ($CC > 1$), es necesario descontar, de la superficie disponible para ralear, aquella porción que ya ha sido raleada durante el ciclo de corta y, así evitar intervenir en dos o más oportunidades la misma área. Existen tantas restricciones como variables de decisión R_{ijkl} , para bosque viejo, a considerar en el modelo.

$$\sum_{i=\left\lfloor \frac{I-(1+e \times (Edmin-(J-I)-1))}{CC} \right\rfloor \times CC + 1 + e \times (Edmin-(J-I)-1)}^I R_{i(i+J-I)KL} + \sum_{i=1+e \times (Edmin-(J-I)-1)}^I X_{i(i+J-I)KL} \leq S_{1(J-I)KL}$$

$$\forall y_{IJKL} = 1; J \geq I$$

La asignación del valor del parámetro binario de la expresión, está sujeta a las siguiente condición:

$$e = \begin{cases} 1 & \text{Si } J - I < Edmin \\ 0 & \text{Si } J - I \geq Edmin \end{cases}$$

- 6) Restricciones de superficie disponible para raleos en bosque nuevo ($I > J$): la superficie a intervenir con raleo en el I -ésimo año del período de conversión, a un bosque nuevo perteneciente a la J -ésima clase de edad de plantación, ubicado en la K -ésima calidad de sitio, con L -ésima estructura de la masa forestal, debe ser menor o igual a la existencia en superficie de este. Cada superficie de raleo, R_{IJKL} , pertenece a un ciclo de corta (CC), y éste comienza cuando el bosque nuevo se encuentra en una clase de edad de plantación igual o superior a la edad mínima de intervención ($Edmin$). Cuando el ciclo de corta es superior a un año ($CC > 1$), es necesario descontar, de la superficie disponible para ralear, aquella porción que ya ha sido raleada durante el ciclo de corta, y así evitar intervenir en dos o más oportunidades la misma área. Existen tantas restricciones como variables de decisión R_{ijkl} , para bosque nuevo, a considerar en el modelo.

$$R_{(j+I-J)jKL} + \sum_{j=Edmin}^J X_{(j+I-J)jKL} - \sum_{l=1}^r \sum_{j=Edmin+v \times (I-J-Edmin)}^{CEI_K^{-1+I-J}} y_{(I-J)jkl} \times X_{(I-J)jkl} \leq 0$$

$$\forall y_{IJKL} = 1; J < I \wedge J \geq Edmin; L = TRANS_l \in \{1, \dots, r\}$$

La asignación de los valores de los parámetros binarios de la expresión, están sujetas a las siguientes condiciones:

$$v = \begin{cases} 1 & \text{Si } Edmin < I - J \\ 0 & \text{Si } Edmin \geq I - J \vee Edmin \geq I - w \times (Edmin - CEI_K) \end{cases}$$

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } CEI_K < Edmin \\ 0 & \text{Si } CEI_K \geq Edmin \end{cases}$$

Restricciones de gestión

Se han formulado cuatro tipos de regulaciones de flujo en MELI. El tomador de decisiones, sólo debe seleccionar un grupo de restricciones de gestión, ya sea regulación del flujo anual de volumen, del valor presente neto (VPN), del valor potencial del suelo (VPS) o del valor

presente total (VPT) del patrimonio, por intervenciones de cosechas (X_{ijkl}) y raleos (R_{ijkl}).

Las restricciones son:

- 1) Restricciones de regulación de flujo anual de volumen: conjunto de limitaciones que regulan el flujo, de un período a otro consecutivo, con una tasa de regulación β , del volumen a obtener por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio, durante el período de conversión. Existen tantas restricciones como $(n - w \times (Edmin - Max(CEI_k))) - 1$ años del período de conversión.

$$\sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-1} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{ijkl} \times (RCOS_{jkl} \times X_{ijkl} + RRAL_{jkl} \times R_{ijkl}) -$$

$$\beta \times \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-2} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{(i-1)jkl} \times (RCOS_{jkl} \times X_{(i-1)jkl} + RRAL_{jkl} \times R_{(i-1)jkl}) = 0$$

$$\forall i = 2 + w \times (Edmin - Max(CEI_k)), \dots, n$$

La asignación del parámetro binario de la expresión, está sujeta a la siguiente condición:

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } Max(CEI_k) < Edmin \\ 0 & \text{Si } Max(CEI_k) \geq Edmin \end{cases}$$

- 2) Restricciones de regulación de flujo anual del valor presente neto (VPN): conjunto de limitaciones que regulan el flujo, de un período a otro consecutivo, con una tasa de regulación β , del valor presente neto (VPN) a obtener por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio, durante el período de conversión. Existen tantas restricciones como $(n - w \times (Edmin - Max(CEI_k))) - 1$ años del período de conversión.

$$\sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-1} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{ijkl} \times (VPN_{ijkl}^{COS} \times X_{ijkl} + VPN_{ijkl}^{RAL} \times R_{ijkl}) -$$

$$\beta \times \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-2} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{(i-1)jkl} \times (VPN_{ijkl}^{COS} \times X_{(i-1)jkl} + VPN_{ijkl}^{RAL} \times R_{(i-1)jkl}) = 0$$

$$\forall i = 2 + w \times (Edmin - Max(CEI_k)), \dots, n$$

La asignación del parámetro binario de la expresión, está sujeta a la siguiente condición:

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } Max(CEI_k) < Edmin \\ 0 & \text{Si } Max(CEI_k) \geq Edmin \end{cases}$$

- 3) Restricciones de regulación de flujo anual del valor potencial del suelo (*VPS*): conjunto de limitaciones que regulan el flujo, de un período a otro consecutivo, con una tasa de regulación β , del valor potencial del suelo (*VPS*) a obtener por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio, durante el período de conversión. Existen tantas restricciones como $(n - w \times (Edmin - Max(CEI_k))) - 1$ años del período de conversión.

$$\sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-1} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{ijkl} \times (VPS_{ijkl}^{COS} \times X_{ijkl} + VPS_{ijkl}^{RAL} \times R_{ijkl}) -$$

$$\beta \times \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-2} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{(i-1)jkl} \times (VPS_{ijkl}^{COS} \times X_{(i-1)jkl} + VPS_{ijkl}^{RAL} \times R_{(i-1)jkl}) = 0$$

$$\forall i = 2 + w \times (Edmin - Max(CEI_k)), \dots, n$$

La asignación del parámetro binario de la expresión, está sujeta a la siguiente condición:

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } Max(CEI_k) < Edmin \\ 0 & \text{Si } Max(CEI_k) \geq Edmin \end{cases}$$

- 4) Restricciones de regulación de flujo anual del valor presente total (*VPT*): conjunto de limitaciones que regulan el flujo, de un período a otro consecutivo, con una tasa de regulación β , del valor presente total (*VPT*) a obtener por intervenciones silvícolas de cosecha y/o raleo en el patrimonio, durante el período de conversión. Existen tantas restricciones como $(n - w \times (Edmin - Max(CEI_k))) - 1$ años del período de conversión.

$$\sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-1} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{ijkl} \times (VPT_{ijkl}^{COS} \times X_{ijkl} + VPT_{ijkl}^{RAL} \times R_{ijkl}) -$$

$$\beta \times \sum_{j=Edmin}^{CEI_k+i-2} \sum_{k=1}^q \sum_{l=1}^r y_{(i-1)jkl} \times (VPT_{ijkl}^{COS} \times X_{(i-1)jkl} + VPT_{ijkl}^{RAL} \times R_{(i-1)jkl}) = 0$$

$$\forall i = 2 + w \times (Edmin - Max(CEI_k)), \dots, n$$

La asignación del parámetro binario de la expresión, está sujeta a la siguiente condición:

$$w = \begin{cases} 1 & \text{Si } Max(CEI_k) < Edmin \\ 0 & \text{Si } Max(CEI_k) \geq Edmin \end{cases}$$

En la función objetivo, es posible maximizar algún indicador, de volumen o financiero, sin imponer ningún tipo de regulación de flujo, entonces, el flujo anual de éste, será de

rendimiento libre. En este caso, el modelo matemático no incorporará ninguna restricción de gestión.

Apéndice II. Características de los planes de ordenación alternativos

| Plan | Función objetivo | Tipo de regulación | Período de conversión (años) | Edad mínima de intervención (años) |
|------|------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Max Vol | Redimientio libre | 10 | 10 |
| 2 | Max Vol | Redimientio libre | 10 | 12 |
| 3 | Max Vol | Redimientio libre | 15 | 10 |
| 4 | Max Vol | Redimientio libre | 15 | 12 |
| 5 | Max Vol | Redimientio libre | 20 | 10 |
| 6 | Max Vol | Redimientio libre | 20 | 12 |
| 7 | Max Vol | Rendimientio constante | 10 | 10 |
| 8 | Max Vol | Rendimientio constante | 10 | 12 |
| 9 | Max Vol | Rendimientio constante | 15 | 10 |
| 10 | Max Vol | Rendimientio constante | 15 | 12 |
| 11 | Max Vol | Rendimientio constante | 20 | 10 |
| 12 | Max Vol | Rendimientio constante | 20 | 12 |
| 13 | Max VPN | Redimientio libre | 10 | 10 |
| 14 | Max VPN | Redimientio libre | 10 | 12 |
| 15 | Max VPN | Redimientio libre | 15 | 10 |
| 16 | Max VPN | Redimientio libre | 15 | 12 |
| 17 | Max VPN | Redimientio libre | 20 | 10 |
| 18 | Max VPN | Redimientio libre | 20 | 12 |
| 19 | Max VPN | Rendimientio constante | 10 | 10 |
| 20 | Max VPN | Rendimientio constante | 10 | 12 |
| 21 | Max VPN | Rendimientio constante | 15 | 10 |
| 22 | Max VPN | Rendimientio constante | 15 | 12 |
| 23 | Max VPN | Rendimientio constante | 20 | 10 |
| 24 | Max VPN | Rendimientio constante | 20 | 12 |
| 25 | Max VPS | Redimientio libre | 10 | 10 |
| 26 | Max VPS | Redimientio libre | 10 | 12 |
| 27 | Max VPS | Redimientio libre | 15 | 10 |
| 28 | Max VPS | Redimientio libre | 15 | 12 |
| 29 | Max VPS | Redimientio libre | 20 | 10 |
| 30 | Max VPS | Redimientio libre | 20 | 12 |
| 31 | Max VPS | Rendimientio constante | 10 | 10 |
| 32 | Max VPS | Rendimientio constante | 10 | 12 |
| 33 | Max VPS | Rendimientio constante | 15 | 10 |
| 34 | Max VPS | Rendimientio constante | 15 | 12 |
| 35 | Max VPS | Rendimientio constante | 20 | 10 |
| 36 | Max VPS | Rendimientio constante | 20 | 12 |
| 37 | Max VPT | Redimientio libre | 10 | 10 |
| 38 | Max VPT | Redimientio libre | 10 | 12 |
| 39 | Max VPT | Redimientio libre | 15 | 10 |
| 40 | Max VPT | Redimientio libre | 15 | 12 |

... Continuación

| Plan | Función objetivo | Tipo de regulación | Período de conversión (años) | Edad mínima de intervención (años) |
|------|------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 41 | Max VPT | Redimimiento libre | 20 | 10 |
| 42 | Max VPT | Redimimiento libre | 20 | 12 |
| 43 | Max VPT | Rendimiento constante | 10 | 10 |
| 44 | Max VPT | Rendimiento constante | 10 | 12 |
| 45 | Max VPT | Rendimiento constante | 15 | 10 |
| 46 | Max VPT | Rendimiento constante | 15 | 12 |
| 47 | Max VPT | Rendimiento constante | 20 | 10 |
| 48 | Max VPT | Rendimiento constante | 20 | 12 |

Apéndice III. Material acompañante digital

En la contratapa de la presente Memoria de Título se encuentra adherido un disco compacto con la siguiente información:

- Parámetros de rodal del patrimonio a ordenar, plantaciones de *Eucalyptus globulus* en la Reserva Nacional Lago Peñuelas, V región de Valparaíso, Chile, hacia el año 2008, en “\Memoria de Título\Análisis de Caso\Rodales-Peñuelas\Rodales-RN-Peñuelas.xls”
- Archivo instalador de MELISOFT, en “\Instalador de MELISOFT\MELISOFTsetup.exe”
- Archivo en formato PDF del diccionario de datos de “Datos.mdb”, en “\Memoria de Título\Diccionario de datos BD MELISOFT.pdf”
- Archivo Microsoft Access 2003 (base de datos) generado por MELISOFT en el procesamiento del análisis de caso, en “\Memoria de Título\Análisis de Caso\Base de datos MELISOFT\Datos.mdb”
- Archivos de texto plano con la formulación de los modelos lineales (formato LINDO) de cada plan de ordenación alternativo, considerado en el análisis de caso, en “\Memoria de Título\Análisis de Caso\Modelos MELISOFT*.txt”
- Archivos de texto plano con la solución primal y dual de modelos lineales (salida LPSOLVE 5.5) de cada plan de ordenación alternativo, considerado en el análisis de caso, en “\Memoria de Título\Análisis de Caso\Soluciones MELISOFT*.txt”
- Archivos Snapshot Viewer 11.0 con los reportes generados por MELISOFT para los planes de ordenación alternativos, considerados en el análisis de caso”, en “\Memoria de Título\Análisis de Caso\Reportes MELISOFT*.snp”