



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

MODELADO DE UN SISTEMA DE PLANIFICACIÓN Y MANEJO DE PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES

Autor: Ing. MSc. María Alejandra Quintero Méndez

Tutor: Dr. Mauricio Jerez Rico

TESIS DOCTORAL

Presentada como requisito final para optar al Grado Académico de
Doctora en Ciencias Aplicadas

MÉRIDA, VENEZUELA

Enero, 2013.



ACTA DE EXAMEN DE TESIS DOCTORAL

I. CONSTITUCIÓN DEL JURADO

En Mérida siendo las 10:00 a.m. del día 04 de Febrero de 2013.

Se constituyó el Jurado para el Examen de Tesis Doctoral del Candidato/a:

MARÍA ALEJANDRA QUINTERO MÉNDEZ

Cumpliendo con los requerimientos exigidos en el Artículo 6 del Reglamento del Doctorado en Ciencias Aplicadas, el jurado quedó conformado de la siguiente manera:

Presidente:

Dra. Magdiel Ablan

Evaluador de la Universidad de Los Andes:

Dr. Argenis Mora

Evaluador de otra Institución

Dr. Miguel Acevedo. Universidad de North Texas

Miembro invitado:

Miembro invitado:

Tutor:

Dr. Mauricio Jerez Rico





II. EXAMEN DE TESIS DOCTORAL. Ing. María Alejandra Quintero Méndez
CI.N° V-11.463.596

**“MODELADO DE UN SISTEMA DE PLANIFICACIÓN Y MANEJO
DE PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES”**

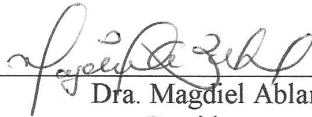
Calificación (Menciones posibles: Aprobado, Aprobado con correcciones formales,
Improbado con derecho a un nuevo examen, Improbado sin derecho a un nuevo examen)

APROBADO

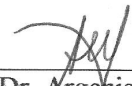
Observaciones:

En Mérida, a las 10:00 am del día 04 de Febrero de 2013 .

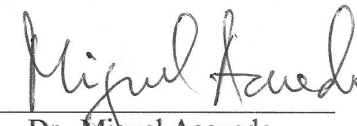
El Jurado:



Dra. Magdiel Ablan
Presidente
Universidad de Los Andes

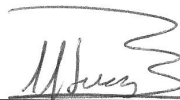


Dr. Argenis Mora
Jurado Interno
Universidad de Los Andes



Dr. Miguel Acevedo
Jurado Externo
(Universidad de North Texas)

Tutor



Dr. Mauricio Jerez Rico
Universidad de Los Andes



AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso, gracias por esta nueva oportunidad de aprender y crecer como profesional, y por darme las fuerzas necesarias para salir adelante.

A la Universidad de Los Andes, por facilitarme el tiempo y los recursos para realizar estudios doctorales.

Al Profesor Mauricio Jerez, por su valiosa orientación durante todo el doctorado, sus ideas y asesoría han sido fundamentales en el desarrollo de este trabajo. Siempre le estaré agradecida.

Al Departamento de Botánica y Ciencias Básicas de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, y a los profesores que me suplieron en las labores de docencia, agradezco su apoyo durante los años que estuve ausente.

A la Profesora Magdiel Ablan, por la asesoría prestada durante la realización del doctorado. Agradezco sus sugerencias y apoyo.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes, CDCHTA - ULA, por otorgar el financiamiento para llevar a cabo la investigación.

A mis padres, por estar presentes siempre que los necesito y por su ayuda incondicional.

A mi esposo Guido, por apoyarme en todos los proyectos que emprendo y por darme ánimo en los momentos más difíciles.

A mis hijos Cristina Alejandra y Andrés Eduardo, por brindarme tantas alegrías y satisfacciones, gracias por entender que en ocasiones fue necesario robarles un poco de tiempo para poder lograr esta meta.

A los que hoy no están físicamente conmigo, Ia, Lolo, Nana y Mariana. Estoy segura que sus bendiciones y buenos deseos siempre me acompañarán.

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un modelo de optimización multiobjetivo para la planificación del manejo en plantaciones forestales industriales dedicadas a la producción de madera y al secuestro de carbono. Es el primer modelo de optimización propuesto en Venezuela para el manejo de plantaciones que combina simulación de crecimiento y rendimiento, técnicas de optimización heurística, producción de madera, y secuestro de carbono.

Se integran dos enfoques de modelado. Un enfoque a nivel de rodal permitió plantear un modelo de optimización para programar los aclareos (edad e intensidad), considerando distintos atributos de un rodal. Un modelo de optimización a nivel de bosque (múltiples rodales) fue planteado para resolver el problema de planificación del aprovechamiento en una plantación, el cual programa los aclareos y determina la edad del turno en cada uno de los rodales, tratando de cumplir con una cuota de producción anual y optimizando los beneficios. El modelo a nivel de rodal se utiliza para generar los mejores regímenes de aclareo, luego, el modelo a nivel de bosque asigna a cada rodal de la plantación uno de estos regímenes. El resultado final es un plan de cortas que indica cuáles rodales deben ser cortados y a qué intensidad en cada año de un período de planificación. Debido a la complejidad de los modelos y al uso de relaciones no lineales, se utilizaron técnicas heurísticas (Algoritmos Genéticos y Recocido Simulado) para encontrar la solución óptima. La integración nivel rodal – nivel bosque es un aporte importante, pues existen escasos trabajos que abordan conjuntamente ambos niveles de planificación.

El modelo fue utilizado para obtener un plan de cortas óptimo para una plantación hipotética de teca (*Tectona grandis* L.f.) de 10000 ha y 200 rodales. Los datos para simular el crecimiento y rendimiento de teca provienen de mediciones realizadas en las Reservas Forestales de Ticoporo y Caparo, Venezuela. El modelo permitió estudiar la interacción entre los regímenes de manejo utilizados, la producción de madera y el secuestro de carbono. Se observó que ambos objetivos entran en conflicto, y que los regímenes que incrementan el secuestro de carbono, disminuyen los beneficios de la producción de madera. Un análisis de sensibilidad indicó que el modelo es sensible a cambios en la tasa de crecimiento, área basal limitante, área basal máxima, precio de la madera, tasa de interés y cuotas de producción.

Los resultados mostraron que el modelo puede ser una herramienta de ayuda en los procesos de toma de decisiones relacionados a la planificación del manejo forestal. Aunque fue desarrollado para teca, puede ser ajustado a otras especies forestales y a condiciones experimentales distintas a las consideradas en este estudio.

Palabras clave: *manejo forestal, programación de cortas, optimización, simulación, heurísticas, secuestro de carbono.*

ABSTRACT

In this study, a multi-objective optimization model for management planning was developed in industrial forest plantations dedicated to timber production and carbon sequestration. It is the first optimization model proposed in Venezuela for plantation management that combines growth and yield simulation, heuristic optimization techniques, timber production, and carbon sequestration.

Two modeling approaches were integrated. A stand-level approach allowed an optimization model for planning thinning (age and intensity) to be proposed, taking into consideration the stand attributes. A forest-level optimization model (multiple stands) was suggested to solve the harvest planning problem in a forest plantation. It determines optimal thinning schedules and rotation age in each of the stands, trying to meet a quota of annual production and optimizing the benefits. Stand-level model is used to generate the best thinning regimes, then the forest-level model assigns one of these regimes to each stand of plantation.

The end result is a harvest plan that indicates those stands that should be cut and the intensity in each year. With the aim to find the optimal solution and because of the complexity of the models and the use of nonlinear relationships, heuristics (Genetic Algorithms and Simulated Annealing) were used. Integration stand level – forest level is an important contribution, since there are few studies that address both levels of planning simultaneously.

The model was used to obtain an optimal harvest plan for a hypothetical teak (*Tectona grandis* L.f.) plantation with 10000 has and 200 stands. The data to simulate the growth and yield of teak come from measurements made in Forest Reserves Ticoporo and Caparo, Venezuela. The model also allowed the study of the interaction between management regimes applied, timber production and carbon sequestration. It was observed that both objectives are in conflict, and that regimes that increase carbon sequestration, reduce the benefits of timber production. A sensitivity analysis indicated that the model is sensitive to changes in the growth rate, limiting basal area, maximum basal area, timber price, interest rate and production quotas.

The results showed that the model can be a helpful tool in the decision-making processes related to forest management planning. Although it was developed for teak, it can also be adjusted to other forest species and experimental conditions different from those considered in this study.

Key words: forest management, harvest scheduling, optimization, simulation, heuristics, carbon sequestration.

INDICE GENERAL

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	xii
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Uso de modelos en Planificación Forestal	5
1.1.1 Nivel de planificación	6
1.1.2 Enfoques de modelado	8
1.1.3 Técnicas de solución en los modelos de optimización	11
1.1.4 Nivel de resolución de los modelos	16
1.2 Problema específico	15
1.3 Objetivos de la tesis	17
1.4 Descripción del modelo desarrollado	18
1.4.1 Especie considerada: teca (<i>Tectona grandis</i> L.f.)	19
1.4.2 Análisis del sistema asociado al modelo	22
1.4.3 Características del modelo	27
1.5 Organización de la tesis	30
1.6 Referencias	31
Capítulo II. Evaluación de tres técnicas heurísticas para resolver un modelo de planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales	45
2.1 Introducción	45
2.2 Materiales y métodos	47
2.2.1 Formulación del problema	47
2.2.2 Modelo matemático	49
2.2.3 Técnicas de optimización utilizadas	50

2.2.4 Implementación de los algoritmos heurísticos	62
2.3 Resultados y Discusión	68
2.4 Conclusiones	75
2.5 Referencias	76
Capítulo III. Modelo de optimización heurística para prescribir regímenes de aclareo en plantaciones forestales	81
3.1 Introducción	81
3.2 Materiales y métodos	86
3.2.1 Modelo de Área Basal	86
3.2.2 Estructura y supuestos del modelo	89
3.2.3 Módulo de crecimiento y rendimiento	91
3.2.4 Modelo matemático	94
3.2.5 Técnica de solución	97
3.2.6 Implementación del modelo	102
3.2.7 Experimentación con el modelo	104
3.2.8 Análisis de sensibilidad	106
3.3. Resultados y Discusión	107
3.3.1 Régimen de aclareo óptimo	107
3.3.2 Análisis de sensibilidad del modelo	118
3.4 Conclusiones	122
3.5 Referencias	123
Capítulo IV. Modelo de optimización heurística para prescribir regímenes de aclareo con consideraciones sobre secuestro de carbono	129
4.1 Introducción	129
4.2 Materiales y métodos	133
4.2.1 Estructura y funcionamiento del modelo	133
4.2.2 Modelo matemático	138
4.2.3 Cálculo del secuestro de carbono	141

4.2.4 Técnica de optimización utilizada para resolver el modelo	145
4.2.5. Implementación del modelo	146
4.2.6 Experimentación con el modelo	146
4.2.7. Análisis de sensibilidad	149
4.3 Resultados y Discusión	150
4.3.1 Régimen de aclareo óptimo para rodales con una densidad inicial de 1111 árboles por hectárea	150
4.3.2 Régimen de aclareo óptimo para rodales con una densidad inicial de 1600 árboles por hectárea	153
4.3.3 Análisis financiero para distintos escenarios de optimización	154
4.3.4 Comportamiento de las variables de rodal	158
4.3.5 Análisis del secuestro de carbono	162
4.3.6 Análisis de sensibilidad	171
4.4 Conclusiones	173
4.5 Referencias	176
Capítulo V. Modelo de optimización heurística para la planificación del manejo en plantaciones forestales, incluyendo producción de madera y secuestro de carbono	182
5.1 Introducción	182
5.2 Materiales y métodos	187
5.2.1 Descripción del problema	187
5.2.2 Estructura y funcionamiento del modelo	188
5.2.3 Modelo matemático	191
5.2.3.1 Sub-modelo 1 (modelo para prescribir regímenes de aclareo en un rodal)	191
5.2.3.2 Sub-modelo 2 (modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación)	192
5.2.4 Técnica de optimización utilizada para resolver el modelo	196

5.2.4.1 Sub-modelo 1 (modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo)	196
5.2.4.2 Sub-modelo 2 (modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación)	196
5.2.5 Implementación del modelo	199
5.2.5.1 Programación del sub-modelo 1 (modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo)	199
5.2.5.2 Programación del sub-modelo 2 (modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación)	200
5.2.6 Caso de estudio	201
5.2.7 Análisis de sensibilidad	207
5.3 Resultados y discusión	209
5.3.1 Regímenes de aclareo alternativos	209
5.3.2 Solución óptima del modelo de aprovechamiento	213
5.3.3 Relación entre los beneficios de la producción de madera y el secuestro de carbono	227
5.3.4 Análisis del secuestro de carbono	228
5.3.5 Tiempo de ejecución de los algoritmos de optimización	233
5.3.6 Análisis de sensibilidad	233
5.4 Conclusiones	235
5.5 Referencias	238
Capítulo VI. Consideraciones finales y conclusiones	241
Anexos	249
Anexo A. Interfaz del modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo.....	250
A.1 Ventanas para introducir los datos de entrada del modelo	250
A.2 Salida del modelo de aclareos	251
Anexo B. Interfaz del modelo de optimización para prescribir regímenes de	

aclareo con consideraciones de carbono	252
B.1 Ventana para introducir los datos de entrada del modelo.....	252
B.2 Salida del modelo de aclareos con secuestro de carbono	253
Anexo C. Interfaz del modelo de optimización para el manejo de plantaciones forestales. Módulo: Prescripción de aclareos	254
C.1 Ventana inicial del modelo de planificación del manejo en plantaciones forestales	254
C.2 Ventana inicial del módulo prescripción de aclareos	255
C.3. Ventana para introducir datos de entrada necesarios para generar varios regímenes de aclareo para un rodal	256
C.4 Ventana que indica los mejores regímenes de aclareo para un rodal	257
Anexo D. Ejemplo de archivo de texto que contiene los datos sobre los rodales necesarios para ejecutar el modelo de planificación del manejo para una plantación	258
Anexo E. Interfaz del modelo de optimización para el manejo de plantaciones forestales. Módulo: Planificación del aprovechamiento	259
E.1 Ventana para introducir los datos de entrada al modelo de planificación del aprovechamiento	259
E.2 Ventana que muestra el mejor programa de cortas encontrado por el modelo	260
E.3 Tablas de salida que indican los volúmenes cosechados	261
E.4 Tabla de salida que muestra los valores del secuestro de carbono	262
Anexo F. Visualización del programa de cortas en un Sistema de Información Geográfica	263
F.1. Rodales que deben ser cortados en un año del período de planificación	263

INDICE DE TABLAS

Capítulo I

1.1. Aplicaciones de las técnicas heurísticas en planificación forestal	15
---	----

Capítulo II

2.1. Datos básicos de los rodales	49
2.2. Solución óptima obtenida mediante Programación Entera Binaria	68
2.3. Parámetros de los algoritmos heurísticos	69
2.4. Estadísticas básicas de las variables de desempeño evaluadas	70
2.5. Mejor solución obtenida por los algoritmos heurísticos	72

Capítulo III

3.1. Datos para la representación de las variables del modelo en código binario	99
3.2. Número de bits necesarios para representar una solución	99
3.3. Parámetros del modelo de crecimiento y rendimiento	104
3.4. Costos utilizados en el modelo	105
3.5. Precios de la madera rolliza	105
3.6. Escenarios utilizados para la variable “Precio de la madera “ en el análisis de sensibilidad del modelo	107
3.7. Parámetros del Algoritmo Genético	107
3.8. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1111 arb ha ⁻¹ (tasa de interés = 10%, costo de corta =14,24 \$ m ⁻³ , precios de la madera según su diámetro)	108
3.9. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1600 arb ha ⁻¹ (tasa de interés = 10%, costo de corta =14,24 \$ m ⁻³ , precios de la madera según su diámetro)	109
3.10. Variables de rodal bajo el régimen óptimo de aclareo (densidad inicial = 1111 arb ha ⁻¹ y tres aclareos)	115

3.11. Análisis de sensibilidad del modelo para la variable “tasa de interés”	119
--	-----

Capítulo IV

4.1. Diferentes usos dados a la biomasa extraída del rodal, tiempo antrópico y tiempo de descomposición	148
4.2. Porcentajes para los tipos de productos a obtener en las diferentes categorías diamétricas aplicables al volumen sin corteza	148
4.3. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1111 arb ha ⁻¹ , considerando el secuestro de carbono como producto	151
4.4. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1600 árboles por ha, considerando el secuestro de carbono como producto	153
4.5. Análisis de sensibilidad del modelo de aclareos con secuestro de carbono para la variable “tasa de interés”	172

Capítulo V

5.1. Plan de establecimiento para el caso de estudio	203
5.2. Cuota de producción anual (madera rolliza con diámetro superior a 20 cm)	204
5.3. Porcentaje del volumen (sin corteza) extraído en una corta que corresponde a madera rolliza con diámetro > 20 cm, según la categoría diamétrica del árbol medio	205
5.4. Costos de transporte	206
5.5. Escenarios utilizados en el análisis de sensibilidad correspondiente a las cuotas de producción	209
5.6. Regímenes de aclareo alternativos obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio I y densidad inicial de 1111 arb ha ⁻¹	210
5.7. Regímenes de aclareo alternativos obtenidos por el modelo de prescripción	

de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio I y densidad inicial de 1600 arb ha ⁻¹	211
5.8. Regímenes de aclareo alternativos obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio II y densidad inicial de 1111 arb ha ⁻¹	212
5.9. Regímenes de aclareo alternativos obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio II y densidad inicial de 1600 arb ha ⁻¹	213
5.10. Plan de cortas para los escenarios “Producción de madera” y “Producción de madera y secuestro de carbono” (resumen)	214
5.11. Plan de cortas para el escenario “Secuestro de carbono” (resumen)	215
5.12. Valor objetivo (VAN) de los planes de corta óptimos	216
5.13. Estadísticas básicas para la variable “turno” de los rodales de la plantación, correspondientes a los planes óptimos de corta en distintos escenarios	217
5.14. Número de aclareos aplicados en los rodales de la plantación bajo diferentes escenarios de optimización	219
5.15. Valor actual neto de los beneficios de la producción de madera (VAN_{madera}) y el secuestro de carbono ($VAN_{carbono}$) en distintos escenarios de optimización, para una plantación de teca de 10000 ha	227

INDICE DE FIGURAS

Capítulo I

1.1. Niveles jerárquicos en la planificación forestal	8
1.2. Distribución natural de la teca (<i>Tectona grandis</i> L.f.) en Asia. Fuente: Weaver, 2000	20
1.3. Representación del sistema asociado al modelo	23
1.4. Representación gráfica del nivel de resolución del modelo	28
1.5. Estructura del modelo de la tesis	30

Capítulo II

2.1. Representación gráfica del problema	48
2.2. Diagrama de flujo básico de Recocido Simulado	53
2.3. Diagrama de flujo básico de Búsqueda Tabú	55
2.4. Conceptos básicos de los Algoritmos Genéticos	57
2.5. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético Simple	61
2.6. Representación de una solución del problema	62
2.7. Valor objetivo (costo total de aprovechamiento) obtenido mediante Programación Entera Binaria y las técnicas heurísticas	70
2.8. Eficacia de las técnicas heurísticas	71
2.9. Tiempo de ejecución de los algoritmos heurísticos	73

Capítulo III

3.1. Desarrollo del área basal en función de la edad y puntos críticos del modelo de área basal. Fuente: Vincent, 1985	88
3.2. Relación entre el IPA de área basal y espesura en términos del área basal. Fuente: Vincent, 1985	88
3.3. Diagrama de funcionamiento del modelo de prescripción de aclareos	90
3.4. Representación de una solución que incluye 2 aclareos	100

3.5 Diagrama de flujo general del modelo de prescripción de aclareos	103
3.6. Valor actual neto (VAN) de los mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo para rodales de teca con una densidad inicial de 1111 y 1600 árboles por ha	110
3.7. Desarrollo del área basal bajo diferentes regímenes de aclareo	111
3.8. Diámetro del árbol medio bajo diferentes regímenes de aclareo	112
3.9. Volumen con corteza bajo diferentes regímenes de aclareo	113
3.10. Cambios en la densidad del rodal bajo diferentes regímenes de aclareo	114

Capítulo IV

4.1. Flujos ^(f) y almacenes ^(a) de carbono en un ecosistema forestal. Fuente: Ordoñez y Masera (2001).....	131
4.2. Procedimiento para calcular el carbono secuestrado en la biomasa para un año cualquiera del período de planificación	136
4.3. Diagrama de funcionamiento del modelo para prescribir regímenes de aclareo con secuestro de carbono	138
4.4. VAN de los mejores regímenes de aclareo (densidad inicial=1111 arb ha ⁻¹)	156
4.5. VAN de los mejores regímenes de aclareo (densidad inicial=1600 arb ha ⁻¹)	156
4.6. Desarrollo del rodal bajo regímenes de manejo que incluyen una densidad inicial de 1111 árboles por ha y la producción de madera como objetivo	159
4.7. Desarrollo del rodal bajo regímenes de manejo que incluyen una densidad inicial de 1111 árboles por ha y el secuestro de carbono como único objetivo	161
4.8. Secuestro neto de carbono en un rodal de teca asociado a turno de 30 años	163
4.9. Carbono almacenado en árboles en pie, productos forestales y desechos correspondientes a un rodal de teca con un turno de 30 años y considerando la producción de madera como objetivo del manejo	165
4.10. Carbono almacenado en productos forestales de corta duración	167
4.11. Carbono almacenado en productos forestales de duración media	169
4.12 Carbono almacenado en productos forestales de larga duración	170

Capítulo V

5.1. Diagrama de funcionamiento del modelo de planificación del manejo forestal	191
5.2. Representación de una solución del problema	197
5.3. Representación de la plantación y disposición de los rodales en el caso de estudio	202
5.4. Volumen extraído (dap>20 cm) bajo los escenarios “Producción de madera” y “Producción de madera y secuestro de carbono”	221
5.5. Volumen extraído (dap>20 cm) bajo el escenario “Secuestro de carbono”	222
5.6. Diámetro promedio del vuelo extraído en distintos escenarios de optimización	223
5.7. Rodales que deben ser cortados en el año 10 según el plan de cortas óptimo, bajo diferentes escenarios de optimización	224
5.8. Rodales que deben ser cortados en el año 25 según el plan de cortas óptimo, bajo diferentes escenarios de optimización	225
5.9. Rodales que deben ser cortados en el año 40 (corta final) según el plan de cortas óptimo bajo diferentes escenarios de optimización	226
5.10. Carbono almacenado en árboles en pie, productos forestales y desechos de las cortas, correspondiente a una plantación de teca de 10000 ha bajo distintos escenarios de optimización	229
5.11. Carbono almacenado en productos forestales de corta duración obtenidos en una plantación de teca de 10000 ha	230
5.12. Carbono almacenado en productos forestales de duración media obtenidos en una plantación de teca de 10000 ha	231
5.13. Carbono almacenado en productos forestales de larga duración obtenidos en una plantación de teca de 10000 ha	232

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El manejo forestal comprende la programación de un conjunto de actividades y tratamientos silvícolas que deben ser aplicados durante la vida de una masa forestal para cumplir con los objetivos planteados. Estos objetivos son variados, pueden tener un carácter netamente económico, persiguiendo la obtención de beneficios a partir de los productos del bosque, o pueden tener implicaciones ambientales y sociales, tales como la conservación de la diversidad biológica, el mantenimiento del hábitat de la fauna, calidad del agua, del suelo y del aire, secuestro de carbono, conservación del paisaje y generación de empleo.

En el caso concreto de las plantaciones forestales, algunas de las actividades relacionadas con el manejo son: establecimiento, control de malezas, fertilización, aclareos, podas, aprovechamiento, construcción de rutas, entre otras. Elegir el momento y el lugar para realizar estas operaciones es la tarea principal de la planificación forestal. Los planes de manejo forestal proporcionan una guía para implementar tratamientos, predecir niveles futuros de cosecha, y optimizar el uso de recursos limitados, mientras se alcanzan los objetivos de la mejor manera posible.

El manejo de un bosque sin tener un plan puede hacerse basado en consideraciones operacionales a corto plazo, pero a largo plazo esto puede ocasionar consecuencias indeseables o imprevistas (Bettinger *et al.*, 2009a). De esta manera, la planificación es un aspecto muy importante del manejo forestal, si un plan no es preparado cuidadosamente, se presentan problemas de programación, control, coordinación, y las actividades que se ejecuten pueden no rendir los resultados esperados.

En los sistemas forestales intervienen múltiples factores, biológicos, ecológicos, ambientales, económicos y sociales, los cuales deben ser tomados en consideración durante el proceso de planificación. Establecer las relaciones entre los factores

intervinientes para conseguir un plan que busque el cumplimiento de los objetivos fijados no es una tarea fácil. Esta complejidad de los sistemas forestales hace necesario el uso de modelos que faciliten la selección de las alternativas más adecuadas, y que proporcionen a los planificadores información pertinente para lograr una mejor comprensión de los efectos que puede generar cualquier decisión. Para tal fin, la planificación forestal ha venido utilizando modelos basados en métodos cuantitativos y sistemas de apoyo a las decisiones, cuyo desarrollo ha sido posible gracias a los avances conseguidos en disciplinas como la investigación de operaciones, la estadística, la ecología y la informática. El desarrollo tecnológico y metodológico actual justifica esa evolución, ya que los complejos problemas de planificación forestal pueden solucionarse eficientemente mediante técnicas como la optimización numérica y herramientas informáticas que hacen uso de modelos dinámicos de crecimiento forestal (Palahí *et al.*, 2004).

Los modelos de planificación forestal basados en métodos cuantitativos han tenido grandes avances a nivel mundial, principalmente en países como Estados Unidos, Suecia, Noruega, Finlandia, Canadá, Chile, España, entre otros, constituyendo una herramienta fundamental en el manejo de bosques tanto públicos como privados. En Venezuela este tipo de modelos son poco utilizados, la mayoría de las decisiones se toman en forma empírica, basadas en la experiencia de los planificadores. Sin embargo, a medida que las decisiones se tornan más difíciles y el número de alternativas se multiplica, el uso de modelos se vuelve imprescindible. Algunas empresas han importado modelos desarrollados en otros países, pero son costosos y en algunos casos no se ajustan a las necesidades de la industria forestal venezolana.

El primer modelo para la planificación de las actividades de aprovechamiento forestal desarrollado en Venezuela es el realizado por Chiari *et al.* (2008). Estos autores elaboraron un modelo de Programación Entera Binaria para establecer un plan de cortas que minimice los costos de aprovechamiento, considerando restricciones técnicas y una cuota anual a cumplir. El modelo da resultados satisfactorios en algunos casos, sin embargo, ante cambios considerables en los parámetros de entrada se torna inestable.

Además, debido a la gran cantidad de variables que son consideradas los tiempos de computación requeridos para alcanzar una solución son elevados.

Ante esta situación, se considera necesario el desarrollo de modelos de planificación que permitan la evaluación de diferentes escenarios de manejo, y que tomen en cuenta las características propias del sector forestal nacional. En Venezuela, la utilización de modelos de planificación forestal es una alternativa que puede contribuir como complemento de gran utilidad al criterio y experiencia de los profesionales del campo forestal y personas encargadas de la toma de decisiones (Chiari, 2005). Los modelos no sustituyen al gestor o propietario forestal, sino que lo apoyan en su proceso decisorio y en la preparación eficiente de los planes de gestión forestal (Palahí *et al.*, 2004). Actualmente, existen técnicas y métodos que, debidamente adaptados a las características de las plantaciones forestales venezolanas e integrando la información y modelos necesarios, pueden facilitar el análisis y la planificación del manejo forestal.

Esta tesis doctoral se enfoca en el desarrollo de un modelo de optimización para la planificación del manejo en plantaciones forestales industriales. Se abordan distintos aspectos de la planificación, tales como la formulación de planes multiobjetivo, la prescripción de regímenes de aclareos y la programación de cortas, se utilizan distintos enfoques de modelado, y se exploran algunas técnicas de solución.

En el modelo se consideran dos objetivos de manejo: producción de madera y secuestro de carbono. La maximización de los beneficios económicos provenientes de la producción de madera en una plantación es el objetivo clásico de los modelos de planificación, en los que se busca la obtención de productos con ciertas características para su posterior procesamiento industrial. Por su parte, el secuestro de carbono es un objetivo ambiental basado en la capacidad de los árboles para capturar y almacenar carbono atmosférico en forma de biomasa. Esta característica de los ecosistemas forestales ha ganado importancia en los últimos años, ya que el carbono es uno de los principales gases de efecto invernadero que influyen en el calentamiento global que actualmente afecta al planeta. Diferentes investigaciones han mostrado que el manejo forestal puede influir en

la capacidad de los bosques, ya sean naturales o plantaciones, para secuestrar carbono (Backéus *et al.*, 2005); por esta razón es de interés estudiar la interacción entre la producción de madera y el secuestro de carbono, incluyendo ambos objetivos en un modelo de planificación. El modelo desarrollado tiene como finalidad proporcionar plan de cortas para una plantación, indicando edad e intensidad de los aclareos que deben realizarse, así como también la edad de la corta final, teniendo presente los objetivos antes mencionados y un conjunto de restricciones operativas.

Tomando en cuenta la experiencia de Chiari *et al.* (2008) referente a la dificultad para obtener soluciones de su modelo mediante Programación Entera Binaria, y considerando la complejidad del problema en estudio, la investigación se enfocó en el uso de técnicas heurísticas para resolver el modelo. En la literatura, diversos trabajos señalan que muchos de los problemas de optimización que se presentan en la práctica no pueden ser resueltos por los métodos clásicos, tales como la Programación Lineal y otras técnicas de programación matemática (Baskent, 2001; Melián *et al.*, 2003; Martí, 2003; Dréo *et al.*, 2006); debido a su complejidad, el tiempo requerido para hacerlo es extremadamente alto y en muchos casos no es posible hallar una solución. En estas situaciones, las técnicas heurísticas son de gran utilidad, pues permiten encontrar buenas soluciones a problemas de optimización difíciles en un tiempo de computación aceptable (Dréo *et al.*, 2006).

En el caso de la planificación forestal, las técnicas heurísticas se han venido utilizando para tratar problemas que incluyen un gran número de variables y/o restricciones, cuando se manejan relaciones no lineales que deben considerarse simultáneamente en la programación de actividades, y en problemas multiobjetivo (Bettinger y Chung, 2004). En Venezuela, poco se ha utilizado la planificación forestal basada en heurísticas, los primeros trabajos reportados en la literatura son producto de las etapas iniciales de esta investigación, en los cuales se analiza el desempeño de algunas heurísticas tales como Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado y Búsqueda Tabú para resolver modelos de optimización del aprovechamiento forestal y sus ventajas frente a los métodos clásicos de programación matemática (Quintero *et al.*, 2010, 2011a, 2011b).

En resumen, el modelo propuesto en esta tesis doctoral utiliza la optimización heurística para planificar las cortas intermedias (aclareos) y la corta final en una plantación forestal, considerando dos objetivos, producción de madera y secuestro de carbono; además, toma en cuenta un conjunto de restricciones operativas relacionadas a una cuota anual de producción y al área basal que se desea mantener durante el turno. Es importante mencionar que el modelo desarrollado no constituye un sistema de apoyo a las decisiones que puede ser empleado o comercializado a nivel general y para diferentes problemas de planificación forestal, puesto que aborda un problema específico bajo ciertas condiciones y supuestos, los cuales se detallan oportunamente en los diferentes capítulos de esta tesis; no obstante, constituye una base sobre la que se puede trabajar en un futuro para resolver problemas similares, adecuando el modelo a otras necesidades y situaciones operativas.

En las siguientes secciones se exponen los conceptos claves relacionados con los modelos de planificación forestal y los métodos de solución, de esta manera, se define el marco teórico en el que se fundamenta la investigación. Igualmente, se describe el problema específico a estudiar, se indican cuáles son los objetivos de la tesis y se señalan de manera más detallada las características del modelo desarrollado.

1.1 Uso de modelos en Planificación Forestal

La planificación forestal basada en métodos cuantitativos supone la formulación de un modelo de planificación específico para cada problema y situación, que requiere la aplicación de técnicas analíticas para elegir aquellas alternativas de manejo que mejor reflejen los objetivos del propietario forestal (Palahí *et al.*, 2004). Dependiendo de las características del problema a tratar, varían el nivel de planificación, los enfoques empleados para formular el modelo, las técnicas de solución, y el nivel de resolución.

1.1.1 Nivel de planificación

La planificación de sistemas complejos tales como los ecosistemas forestales, puede ser vista como un proceso jerárquico, llevado a cabo en diferentes etapas. Los niveles de esta jerarquía son: estratégico, táctico y operacional.

Planificación estratégica

En este nivel se fijan los objetivos a largo plazo y se definen las condiciones bajo las cuales se debe operar, tanto a mediano como a corto plazo; las decisiones estratégicas tienen como finalidad el establecimiento de políticas globales de manejo forestal, la definición de la capacidad de producción, la selección de productos finales, y la adquisición de recursos (capital, tierras, maquinaria y tecnología), en función de las demandas proyectadas para los diferentes bienes y servicios del bosque y de las condiciones técnico – legales que regulan su utilización (Weintraub y Cholaky, 1991). Por ejemplo, un plan estratégico de manera general puede definir el área que se dedicará a diferentes usos y las cantidades específicas de diferentes tipos de madera que serán cosechadas. A este nivel no se establece la ubicación geográfica donde estas actividades ocurrirán, en la mayoría de los casos los modelos de planificación estratégica no consideran información espacial. El horizonte de tiempo a nivel estratégico está determinado en gran parte por la tasa de crecimiento de los árboles, pudiendo ir desde una rotación hasta 100 años en el futuro. En este tipo de modelos es común emplear como unidad de tiempo períodos de 5 o 10 años.

Aunque las consideraciones varían entre países y empresas, a nivel industrial, la planificación estratégica usualmente tiene como meta asegurar una estabilidad a largo plazo en el suministro de madera a la industria, mientras se maximiza el valor actual neto (Martell *et al.*, 1998). Sin embargo, los modelos además de la producción de madera, han ampliado su alcance al considerar otros aspectos de los bosques, tales como la biodiversidad, secuestro de carbono, recreación, y la obtención de productos no maderables, entre otros.

Planificación Táctica

El objetivo principal es programar las operaciones de cosecha, especificando áreas en una escala de tiempo más fina (Martell *et al.*, 1998). Además de programar las cosechas, la planificación táctica se enfoca en determinar dónde y cuándo se llevarán a cabo diferentes actividades tales como la aplicación de tratamientos silviculturales (ej. podas, aclareos, fertilización, irrigación,) y el desarrollo de rutas forestales o mantenimiento de las rutas existentes, siempre teniendo presente los objetivos establecidos en la planificación estratégica (Davis *et al.*, 2001).

Los datos que la planificación estratégica proporciona a la planificación táctica generalmente se refieren al volumen que se desea producir. El horizonte de planificación varía desde 10 a 30 años, y es común incluir información espacial.

Planificación operacional

Organiza la ejecución de los planes tácticos, incluyendo detalles más precisos de la programación de las operaciones a corto plazo, sobre una base semanal o mensual. Las decisiones abarcan aspectos como selección y localización de la maquinaria de cosecha, contratación de mano de obra, asignación de tareas, actividades de transporte de madera, diseño de diagramas de corta, programación y secuenciación de trabajos. Los planes operacionales son guiados por los planes tácticos, los cuales se elaboran en función de los planes estratégicos (Troncoso, 2002).

La Figura 1.1 resume las características y las actividades más importantes relacionadas a los tres niveles de planificación: estratégico, táctico y operacional. En la práctica, los procesos de planificación forestal que llevan a cabo las organizaciones no siempre siguen esta estructura jerárquica, en algunos casos solo se planifica en uno o dos niveles, por ejemplo, se desarrollan un plan estratégico y varios planes operacionales (Bettinger *et al.* 2009a).



Figura 1.1. Niveles jerárquicos en la planificación forestal

1.1.2 Enfoques de modelado

En la solución de problemas de planificación forestal se emplean diferentes enfoques de modelado, de acuerdo al problema y los objetivos que se persiguen. Entre ellos se han destacado la simulación y los modelos de optimización.

Simulación

Consiste en la construcción de un modelo de un sistema real y la conducción de experimentos con el modelo. Esta técnica permite estudiar el comportamiento de un sistema forestal; sus aplicaciones van desde la predicción del crecimiento como respuesta a la aplicación de diferentes regímenes silviculturales (espaciamiento inicial, podas, aclareos, fertilización) hasta la planificación del manejo para varios turnos de corta. Los modelos de simulación forestal que describen la dinámica del bosque (crecimiento, mortalidad, sucesión, regeneración y otros cambios asociados al rodal) pueden ser utilizados para pronosticar su desarrollo futuro, la estructura del ecosistema, la

composición de especies y la función de diferentes componentes del bosque bajo condiciones ambientales cambiantes (Vargas *et al.*, 2008).

Los modelos de simulación en el contexto de la planificación forestal, son programas de computación (simuladores) que determinan los flujos e inventarios de madera y recursos no maderables, como consecuencia de aplicar opciones de manejo definidas por el usuario (Turland, 2007). Los modelos de simulación no consideran la optimización de un objetivo, sino que muestran las consecuencias de las decisiones silviculturales sobre el desarrollo de una masa forestal. En este punto es importante mencionar que la experiencia y la habilidad del usuario del modelo son muy importantes, ya que de ellas depende la calidad de las opciones de manejo cuyos efectos son simulados por el modelo.

Los modelos de simulación que se usan en la planificación forestal se basan en modelos de crecimiento, los cuales incluyen un conjunto de ecuaciones matemáticas y las relaciones entre ellas, para predecir el crecimiento y rendimiento de un bosque bajo una amplia variedad de condiciones. Estos modelos comenzaron a utilizarse desde los años 60 y hoy en día han alcanzado un enorme desarrollo, siendo de gran ayuda para la toma de decisiones en el manejo de bosques naturales y plantaciones debido a su capacidad para actualizar inventarios, predecir el rendimiento futuro, y explorar los efectos de distintas alternativas de manejo, como por ejemplo rendimiento por tipo de productos, volumen por tamaños y clases de calidad (Vanclay, 1994).

Modelos de optimización

Son modelos matemáticos que representan un sistema real y permiten obtener la mejor solución al problema planteado. En general, estos modelos tienen tres componentes básicos: variables de decisión, función objetivo y restricciones. Las variables de decisión representan las decisiones cuantificables que pueden tomarse y cuyos valores se quieren determinar con el modelo, por ejemplo, área a la que se le aplicará un tratamiento, edad de un rodal en la que se efectuará un aclareo. Por su parte, la función objetivo es una medida del desempeño del sistema y es la cantidad que se desea optimizar (maximizar o

minimizar), tal como costos, beneficios, volumen de madera a cosechar, impacto ambiental. Las restricciones representan relaciones, expresadas mediante ecuaciones o desigualdades, que ciertas variables de decisión o funciones de éstas deben satisfacer; como por ejemplo la cuota de producción que se debe cumplir, el área máxima a aprovechar. Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor de las variables de decisión para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones (Hillier y Lieberman, 2001).

Los modelos de optimización en el contexto de la planificación forestal, son programas de computación que buscan la solución óptima para un problema de planificación de las actividades de manejo. Tanto los objetivos como las restricciones pueden ser económicos, ambientales y sociales. Una ventaja de la optimización con respecto a la simulación, es que al obtener un programa de manejo se está seguro que cumple con ciertas condiciones, como por ejemplo la maximización de los beneficios o la minimización de los costos.

Con frecuencia los modelos de optimización para la planificación del manejo forestal trabajan conjuntamente con un modelo de simulación del crecimiento. El modelo de optimización busca la mejor solución, pero en el proceso debe evaluar esa solución en función del efecto que tiene en el desarrollo del bosque, los beneficios que origina, los volúmenes de madera que es capaz de producir, o cualquier otro indicador; esto lo hace con ayuda de un modelo de simulación. En otras aplicaciones, un simulador genera un conjunto de posibles regímenes de manejo y un modelo de optimización asigna a cada rodal o compartimiento del bosque uno de esos regímenes, de manera que se optimice una función objetivo y se satisfagan las restricciones impuestas (Palahí *et al.*, 2004; Raymer *et al.*, 2009).

Un sistema informático que integra modelos de simulación, modelos de optimización y además incluye un sistema de gestión de base de datos que recoge mediciones realizadas en inventarios forestales, se denomina sistema de planificación forestal o sistema de soporte a la decisión (Palahí *et al.*, 2004; Mäkinen, 2010). Este tipo de sistemas por lo general también cuenta con herramientas de visualización, las cuales permiten observar

las relaciones espaciales entre los recursos forestales y facilitan la comparación entre distintos escenarios de manejo.

1.1.3 Técnicas de solución en los modelos de optimización

Un problema de optimización se puede resolver de dos maneras, utilizando métodos exactos (programación matemática) o mediante la aplicación de métodos heurísticos.

Métodos exactos o Programación Matemática

Los métodos exactos proporcionan una solución óptima para un problema desde el punto de vista matemático, si existe una solución factible. Estos métodos son conocidos también como técnicas de programación matemática, y comprenden un conjunto de procedimientos y algoritmos diseñados para resolver problemas de optimización. Algunas de las técnicas de programación matemática son: Programación Lineal, Programación Entera, Programación por Metas, Programación Dinámica, Programación Estocástica y Programación No Lineal.

Una ventaja de la programación matemática es que garantiza que la solución encontrada es la óptima, es decir, la que maximiza o minimiza el valor de la función objetivo. Además, cuenta con algoritmos contrastados y de propósito general (ej. método simplex para Programación Lineal) que pueden utilizarse en problemas de diversa índole, existiendo en el mercado una amplia lista de paquetes de optimización que permiten su aplicación (ej. SAS OR, LINDO, CPLEX, FortMP, Solver de Excel, entre muchos otros).

En la literatura se encuentran numerosos trabajos que plantean modelos de programación matemática para facilitar la gestión forestal. Una de las técnicas más populares es la Programación Lineal, que se usa cuando la función objetivo y las restricciones pueden expresarse mediante funciones lineales. En planificación forestal se ha empleado desde la década de los 60 (Curtis, 1962; Loucks, 1964; Kidd *et al.*, 1966) y aún tiene aplicaciones en la programación de diversas actividades concernientes a la

producción forestal, tales como la planificación de cosechas considerando diversos productos del bosque como madera, agua, carbono, energía (Backéus *et al.*, 2005; Baskent *et al.*, 2008; Baskent y Keles, 2009; Frombo *et al.*, 2009; Raymer *et al.*, 2009), y tareas de transporte forestal (Flisberg *et al.*, 2009; Frisk *et al.*, 2010). Ha sido especialmente útil para abordar problemas de planificación estratégica (Gunn, 2007).

Otras técnicas de programación matemática también se han utilizado con éxito en planificación forestal, destacándose la Programación Entera, la Programación por Metas y la Programación Dinámica. La Programación Entera es una extensión de la Programación Lineal que se usa cuando las variables de decisión deben tomar valores enteros; si se requiere que sólo algunas de las variables sean enteras, se habla de Programación Entera Mixta; en los casos en que las variables son ceros o unos se tiene un problema de Programación Entera Binaria. La Programación por Metas también es una variante de la Programación Lineal y permite optimizar varios objetivos de manera simultánea. Por su parte, la Programación Dinámica es un enfoque para resolver problemas en los que es necesario tomar decisiones en etapas sucesivas, pudiendo manejar relaciones lineales o no lineales. Entre los múltiples trabajos que proponen modelos de planificación forestal basados en estos enfoques pueden citarse los siguientes:

Programación Entera: Walker y Preiss (1980), Nelson y Brodie (1990), Crowe *et al.* (2003), Troncoso y Garrido (2005), Chiari *et al.* (2008), Öhman y Wikstrom (2008), Öhman *et al.* (2009), Goycoolea *et al.* (2009), Öhman y Ericsson (2010), Öhman *et al.* (2011), Fonseca *et al.* (2012).

Programación por metas: Field (1973), Dane *et al.* (1977), Field *et al.* (1980), Arp y Lavigne (1982), Kangas y Pukkala (1992), Díaz-Balteiro y Romero (1998), Bertomeu *et al.* (2009), Diaz-Balteiro *et al.* (2009); Eyvindson *et al.* (2012).

Programación dinámica: Amidon y Akin (1968), Brodie y Kao (1979), De Kluyver *et al.* (1980), Anderson y Bare (1994), Hoganson y Borges (1998), Asante *et al.* (2011).

A pesar de que las técnicas de programación matemática han sido exitosas para resolver problemas de optimización en todos los campos de la ciencia, incluyendo la planificación forestal, existen situaciones prácticas en las que estos métodos fallan en encontrar la solución óptima. Hay problemas de optimización que debido a su complejidad (ej. relaciones no lineales, condiciones de difícil modelización) o gran tamaño (demasiadas variables o restricciones), no pueden ser resueltos mediante programación matemática, pues el tiempo requerido para hacerlo es muy alto, aumentando exponencialmente con el tamaño del problema. En algunos casos, los algoritmos simplemente colapsan antes de encontrar una solución. Si además de ser complejo, el problema se debe resolver repetidas veces, por ejemplo, cuando se debe determinar diariamente valores de las variables de interés, se requerirá de un procedimiento eficiente que brinde soluciones de manera rápida. En otras circunstancias se desea obtener además de la solución óptima, otras buenas soluciones que puedan ser implementadas en caso de que ocurra alguna eventualidad que no permita llevar a la práctica la solución óptima, o simplemente se requiere contar con un conjunto de alternativas entre las cuales decidir, en esos casos la solución encontrada por un método exacto es insuficiente.

En las situaciones en las que se hace difícil o imposible aplicar un método exacto para resolver un modelo de optimización, es necesario recurrir a otros métodos de solución alternativos tales como los métodos heurísticos.

Métodos heurísticos

Los métodos heurísticos son procedimientos que imitan fenómenos observados en la naturaleza y utilizan la estructura del problema de forma inteligente para buscar buenas soluciones de una manera sencilla y rápida. En el campo de la optimización, las heurísticas pueden encontrar una solución de alta calidad a un costo computacional razonable, pero a diferencia de los métodos exactos no garantizan optimalidad, e incluso, en algunos casos, no se llega a establecer lo cerca que se está de dicha situación (Reeves, 1996). Los métodos heurísticos incluyen una amplia variedad de procedimientos tales como los métodos GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*), algoritmos

voraces y de ascensión de colinas, Recocido Simulado (*Simulated Annealing*), Búsqueda Tabú, Algoritmos de Colonia de Hormigas, Método de Aceptación por Umbrales (*Threshold Accepting*), Algoritmos Evolutivos entre los cuales se encuentran Algoritmos Genéticos, Algoritmos Meméticos, Estrategias Evolutivas y Búsqueda Dispersa (*Scatter Search*), entre otros (Melián *et al.*, 2003).

El uso de métodos heurísticos en planificación forestal ha sido un tema de investigación muy activo en las últimas dos décadas, por lo que existen numerosas aplicaciones en la literatura (Pukkala y Kurttila, 2005; Liu *et al.*, 2006; Pukkala y Heinonen, 2006; Sessions *et al.*, 2007; Bettinger *et al.*, 2009 b). Con el transcurrir del tiempo, los planificadores forestales se han visto en la necesidad de incluir criterios cada vez más diversos y complejos con el fin de asegurar una gestión ecológicamente respetuosa, socialmente aceptable y económicamente viable. Este nuevo paradigma ha requerido de un mayor uso de objetivos espaciales y de relaciones no lineales en los modelos de planificación forestal para reproducir la realidad lo mejor posible. En este contexto, los métodos clásicos de optimización dejan muchas veces de ser efectivos, por lo que son necesarios los métodos heurísticos para obtener soluciones de alta calidad en un tiempo razonable (Palahí y Pukkala, 2004).

En el ámbito de la planificación forestal, las heurísticas se comenzaron a utilizar a finales de los años 80, y gracias a su capacidad para resolver problemas complejos de manera eficiente, sus aplicaciones han crecido rápidamente en los distintos niveles de planificación: estratégico, táctico y operacional. Diferentes técnicas heurísticas se han empleado para abordar distintos aspectos de la planificación forestal. En la Tabla 1.1 se listan las técnicas más utilizadas, los tipos de problemas en los que se han aplicado y algunas referencias bibliográficas. Se observa que las técnicas más usadas son Recocido Simulado, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos, aunque también se han aplicado simulación Monte Carlo, método HERO, Método de Aceptación por Umbrales, Búsqueda dispersa, Ascenso Aleatorio de Colinas, Algoritmos de Colonia de Hormigas, y métodos híbridos que combinan dos heurísticas o Programación Lineal con una técnica heurística.

Tabla 1.1. Aplicaciones de las técnicas heurísticas en planificación forestal

Tipo de heurística y uso	Referencias
Monte Carlo	
Programación de cortas con restricciones espaciales	O'Hara <i>et al.</i> (1989), Clements <i>et al.</i> (1990), Daust y Nelson (1993), Jamnick y Walters(1993),Boston y Bettinger (1999).
Programación de cosechas / transporte	Nelson y Brodie (1990).
Vinculación de planes estratégicos y tácticos	Nelson <i>et al.</i> (1991).
Recocido Simulado (Simulated Annealing)	
Programación de cortas con restricciones espaciales	Lockwood y Moore (1993), Murray y Church (1995), Tarp y Helles (1997), Dahlin y Sallnas (1993), Boston y Bettinger (1999), Chen y Gadow (2002), Crowe y Nelson(2005), Liu <i>et al.</i> , (2006).
Programación de cosechas / transporte	Murray y Church (1995), Van Deusen (1999), Falcao y Borges (2003), Rodrigues <i>et al.</i> (2004 b), Pukkala y Kurttila (2005), Quintero <i>et al.</i> (2010), Quintero <i>et al.</i> (2011 b).
Múltiples objetivos	Baskent y Jordan (2002), Bettinger <i>et al.</i> (2002), Heinonen y Pukkala (2004), Chen y Gadow (2008), González-Olavarría y Pukkala (2010), Liu <i>et al.</i> (2011).
Búsqueda Tabú	
Programación de cortas con restricciones espaciales	Brumelle <i>et al.</i> (1998), Boston y Bettinger (1999), Falcao y Borges (2002), Richards y Gunn (2003), Boston y Bettinger (2006), Zhu y Bettinger (2008).
Programación de cosechas / transporte	Richards y Gunn (2000), Rodrigues <i>et al.</i> (2003), Pukkala y Kurttila (2005), Bettinger <i>et al.</i> (2007), Díaz <i>et al.</i> (2007), Quintero <i>et al.</i> (2010), Quintero <i>et al.</i> (2011 a).
Múltiples objetivos	Krcmar <i>et al.</i> (2001), Bettinger <i>et al.</i> (2002), Heinonen y Pukkala (2004), Nalle <i>et al.</i> (2004), Zeng <i>et al.</i> (2007a), Liu <i>et al.</i> (2011).
Programación de aclareos	Wikström y Eriksson (2000).
Algoritmos Genéticos	
Programación de cortas con restricciones espaciales	Falcao y Borges (2002), Ducheyne <i>et al.</i> (2004), Thompson <i>et al.</i> (2009), Boston y Bettinger (2006).
Programación de cosechas / transporte	Lu y Eriksson (2000), Falcao y Borges (2003), Rodrigues <i>et al.</i> (2004 a), Pukkala y Kurttila (2005), Gomide <i>et al.</i> (2009), Quintero <i>et al.</i> (2011a), Quintero <i>et al.</i> (2011b).
Múltiples objetivos	Bettinger <i>et al.</i> (2002), Zeng <i>et al.</i> (2007a), Liu <i>et al.</i> (2011),Chikumbo y Straka (2012), Fotakis <i>et al.</i> (2012)
Programación de aclareos	Chikumbo y Nicholas (2011.)
Otras	
Programación de cortas con restricciones espaciales	Yoshimoto <i>et al.</i> (1994), Boston y Bettinger (2002), Crowe y Nelson (2003), Martins <i>et al.</i> (2005).
Programación de cosechas / transporte/ localización de maquinarias	Pukkala y Kangas (1993), Weintraub <i>et al.</i> (1994), Weintraub <i>et al.</i> (1995), Andalaft <i>et al.</i> (2003), Seo <i>et al.</i> (2005), Epstein <i>et al.</i> (2006), Vielma <i>et al.</i> (2007).
Múltiples objetivos	Bettinger <i>et al.</i> (2002), Bettinger <i>et al.</i> (2003), Zeng <i>et al.</i> (2007b), Gomez <i>et al.</i> (2011).
Programación de aclareos	Pukkala (2009).

Es importante señalar que el desempeño de los métodos heurísticos depende del tipo de problema que se esté tratando, de las estrategias de diseño utilizadas en los algoritmos y de los valores de los parámetros utilizados, razón por la cual se sigue investigando su aplicación en diferentes problemas de planificación (Pukkala y Heinonen, 2006).

1.1.4 Nivel de resolución de los modelos

Otro aspecto importante relacionado a los modelos de planificación forestal es su nivel de resolución. Se distinguen los modelos a nivel de rodal y los modelos a nivel de bosque (múltiples rodales).

Modelos a nivel de rodal

En este tipo de modelos la planificación se realiza en forma independiente para un rodal, eligiendo el mejor plan de manejo de acuerdo a los objetivos que se desean alcanzar. Dos problemas concretos a nivel de rodal han sido objeto de atención de los planificadores forestales: la programación de tratamientos intermedios para rodales coetáneos y disetáneos, y el problema del turno óptimo (Bettinger *et al.*, 2009a). Tradicionalmente estos problemas son tratados desde el punto de vista económico, sin embargo, más recientemente se han incluido objetivos ambientales. Las técnicas de optimización más utilizadas para resolver problemas a nivel de rodal son la Programación Dinámica, el método de búsqueda Hooke y Jeeves, y los métodos heurísticos, siendo la primera técnica la que tiene más aplicaciones (Bettinger *et al.*, 2005).

Modelos a nivel de bosque

Consideran un conjunto de rodales en forma simultánea, los cuales deben ser manejados de la mejor manera posible para satisfacer los objetivos establecidos para todo el bosque, cumpliendo con un conjunto de restricciones. Su principal finalidad es producir un plan de aprovechamiento, también llamado programa de cortas, el cual consiste en un listado de los rodales que serán sometidos a cortas intermedias o a la corta final durante cada

año del período de planificación, el cual se extiende por varios años (Clutter *et al.*, 1983). Los métodos que más se utilizan en este tipo de modelos son la Programación Lineal y sus variantes, y los métodos heurísticos.

1.2 Problema específico

El problema objeto de esta investigación consiste en la planificación de un sistema de cortas para una unidad de producción forestal conformada por múltiples rodales de una misma especie. Cada rodal tiene características que lo distinguen, como por ejemplo, ubicación, densidad inicial de plantación, calidad de sitio, año de plantación y tasa de crecimiento. Se requiere definir un plan de manejo que asigne a cada rodal un régimen de aclareo y establezca el año en que debe realizarse la corta final, de tal manera que se maximicen los beneficios de la plantación obtenidos por la producción de madera y el secuestro de carbono.

Se requiere cumplir con una cuota anual de producción de madera, para lo cual es posible realizar cortas en varios rodales en un mismo año, la madera aprovechada puede ser extraída en los aclareos o en la corta final de algunos rodales, de acuerdo a los volúmenes disponibles. Asimismo, se debe lograr la mayor concentración de las operaciones de corta en rodales cercanos con el objetivo de evitar los costos por movimiento de maquinaria.

En la planificación deben tomarse en cuenta los ingresos que se producen por la venta de madera y los costos involucrados, tales como los costos de establecimiento, costos de mantenimiento, costo de efectuar una corta y costo de transportar la madera aprovechada. También se considera el secuestro de carbono en el proceso de planificación, puesto que es sabido que los regímenes de manejo pueden afectar la capacidad de los bosques para fijar y almacenar carbono en su biomasa vegetal (Backéus *et al.*, 2005). Hoy en día, ante el problema del calentamiento global, el papel de los bosques en la disminución de las concentraciones de carbono en la atmósfera es primordial. Por tal motivo, es importante investigar las relaciones entre el secuestro de

carbono y la producción de madera, para establecer si es posible definir un plan de manejo forestal que ayude a mitigar las emisiones de carbono a la vez que genera beneficios económicos.

De esta manera, se requiere el desarrollo de un modelo que permita determinar un plan de cortas óptimo para un período de planificación determinado, el cual debe indicar cuáles rodales se deben cortar cada año y en qué intensidad, considerando las especificaciones antes señaladas.

1.3 Objetivos de la tesis

Objetivo general

Desarrollar un modelo de optimización heurística para planificar las operaciones de manejo en plantaciones forestales dedicadas a la obtención de productos madereros y secuestro de carbono.

Objetivos específicos

1. Diseñar un modelo de planificación del manejo forestal que determine un plan de cortas que maximice los beneficios económicos obtenidos de la producción de madera y el secuestro de carbono para una plantación conformada por múltiples rodales.
2. Desarrollar un modelo que determine regímenes óptimos de aclareos para un rodal, indicando edad e intensidad de los mismos, tomando en consideración factores biológicos, ambientales y financieros.
3. Analizar la interacción entre la producción de madera y el secuestro de carbono, haciendo uso de un modelo multiobjetivo que permita incorporar ambos productos en la optimización del manejo forestal.
4. Explorar y comparar diferentes metodologías heurísticas para resolver el modelo.

5. Utilizar el modelo para analizar escenarios que representen diferentes alternativas de manejo para una plantación forestal industrial.

1.4 Descripción del modelo desarrollado

1.4.1 Especie considerada: teca (*Tectona grandis* L.f.)

Para desarrollar el modelo se seleccionó la teca (*Tectona grandis* L.f), especie que posee un alto valor comercial y cuya madera tiene una amplia gama de usos. La teca es una de las especies más importantes para plantaciones forestales en zonas tropicales; debido a su calidad, apariencia, durabilidad, gran resistencia al ataque de hongos e insectos, y a sus excelentes características, se le considera como una de las más valiosas a nivel mundial (Fonseca, 2004). La madera de teca es usada en la fabricación de muebles, construcción de puentes y muelles, construcción naviera y en carpintería en general (Osorio, 1997).

La teca crece de manera natural desde la latitud 23° a la 10° N, aproximadamente, en el Sudeste de Asia, en un área que comprende la mayoría de la India peninsular, gran parte de Myanmar y partes de Laos y Tailandia (véase Figura 1.2). Hace varios siglos fue introducida a Java y algunas de las islas menores del archipiélago de Indonesia y posteriormente a las Filipinas. Hoy en día la teca se ha naturalizado en estos países, y plantaciones bien establecidas se extienden ahora desde la latitud 28° N a la 18° S en el Sudeste de Asia, Australia, África y Latinoamérica (Weaver, 2000).

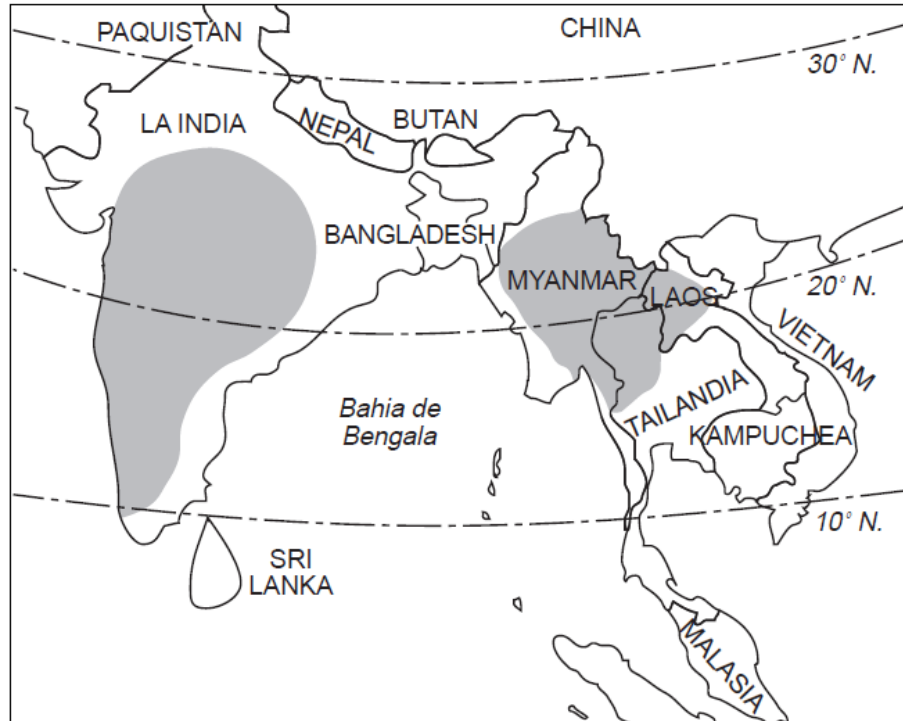


Figura 1.2. Distribución natural de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en Asia.

Fuente: Weaver, 2000

En 1842 se iniciaron en la India las primeras plantaciones de teca (Chaturvedi, 1995). A finales del siglo XIX la mayoría de las plantaciones de esta especie fuera de su área de distribución natural estaban concentradas en Sri Lanka, Bangladesh y Paquistán (Vaclav y Skoupy, 1972). Más tarde, debido al comportamiento positivo de estas plantaciones, la teca se difundió a otros países tropicales y subtropicales del este y oeste de África, el Caribe, América Central y Suramérica (Chakraborti y Gahawrwar, 1995).

La teca fue introducida a América en Trinidad en 1913, utilizando fuentes de semilla de Myanmar (antes Birmania) (Keogh, 1979). Desde entonces se ha plantado teca en casi todos los países de América tropical. En Venezuela esta especie se introdujo en 1936 en Rancho Grande, Estado Aragua y para 1959 se plantó principalmente en fincas (Betances, 1986). Luego, en 1971 se establece como parte de los planes silviculturales de las empresas encargadas del manejo de las áreas bajo Reserva, específicamente las Reservas

Forestales de Caparo y Ticoporo, donde se adaptó satisfactoriamente a suelos arenosos, bien drenados, presentando rápido crecimiento, buena forma y baja mortalidad (Aguilar *et al.*, 1985; Valera *et al.*, 2001).

Venezuela tiene aproximadamente entre 6000 y 10000 ha plantadas con teca en la región conocida como Llanos Occidentales (Jerez *et al.*, 2003). Estas plantaciones fueron establecidas en los años 70 y 80, en su mayor parte por entes públicos y concesionarias privadas que operaban en las reservas forestales. Según el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (2010), en el año 2008 la *Tectona grandis* ocupó el quinto lugar en orden de importancia en cuanto a la producción de madera rolliza, con un 0,60% de la producción nacional, después de *Pinus caribaea* (83,40%), *Eucalyptus sp.* (7,99%), *Samanea saman* (2,58%) y *Erisma uncinatum* (0,88%).

En los Llanos Occidentales del país, las plantaciones de teca, así como la de otras especies como la gmelina (*Gmelina arborea*), se concibieron inicialmente con el objetivo de producir materia prima para aserrío, por ser especies exóticas de crecimiento rápido, pero cuya madera, especialmente la de teca, es de muy alta calidad. Sin embargo, hoy día las perspectivas se han orientado adicionalmente hacia el suministro de madera para la pequeña industria y la artesanía, y las plantaciones, principalmente de teca, se están realizando a escala reducida por parte de pequeños propietarios cuya actividad primaria es la agrícola o pecuaria, y que esperan obtener algunos ingresos adicionales a aquéllos provenientes de sus actividades tradicionales. Ante este panorama, donde existen y se continúan estableciendo plantaciones a diversas escalas, con distintos propósitos y bajo diferentes condiciones socio-económicas y ambientales, se plantea un problema común en todos los casos: ¿Cómo manejar estas plantaciones para que cumplan los objetivos y metas para las cuales fueron creadas? (Jerez, 2008).

A pesar de su larga historia como una especie en plantación, hay una falta de información confiable sobre el crecimiento y la productividad de las plantaciones de teca, aún existen vacíos acerca del manejo en rotaciones cortas, la dinámica del crecimiento, frecuencia e intensidad de los aclareos, entre otros (Fonseca, 2004; Pérez, 2005). En Venezuela, la

determinación de regímenes de manejo apropiados se ha venido llevando a cabo mediante investigaciones basadas en ensayos de campo, las cuales han producido información valiosa sobre cómo mejorar el rendimiento, sin embargo, aún no se ha logrado determinar cuál es el régimen óptimo desde el punto de vista biológico-financiero. Esto ha conducido a que, hoy día, todavía existan grandes dudas con respecto a los regímenes silviculturales a prescribir para lograr metas particulares de producción (Jerez, 2008).

Recientemente en la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes (FCFA-ULA), se ha venido trabajando en la construcción de modelos de simulación para explorar los efectos de la aplicación de diferentes regímenes de manejo en las plantaciones de teca (Quintero *et al.*, 2012). En esa misma línea de investigación que considera el uso de modelos para el facilitar el manejo forestal, esta tesis doctoral pretende ser un aporte, ya que combina modelos de optimización y un modelo de crecimiento y rendimiento, para abordar distintos aspectos de la planificación del manejo de teca. Este trabajo se desarrolló utilizando datos disponibles provenientes de las plantaciones de teca de las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo, e integra información generada en otras investigaciones que se han llevado a cabo en la FCFA-ULA (Zambrano, 1993; Zambrano *et al.*, 1995; Osorio, 1997; Moret *et al.*, 1998; Zambrano *et al.*, 2001).

1.4.2 Análisis del sistema asociado al modelo

Se considera que en el sistema en estudio hay tres subsistemas que pueden influir en la planificación del manejo en una plantación. Estos son: subsistema Rodales, subsistema Manejo Forestal y subsistema Financiero, cada uno proporciona información importante para la construcción del modelo. En la Figura 1.3 se observa un diagrama del sistema que muestra los distintos subsistemas que lo conforman y las interrelaciones entre ellos.

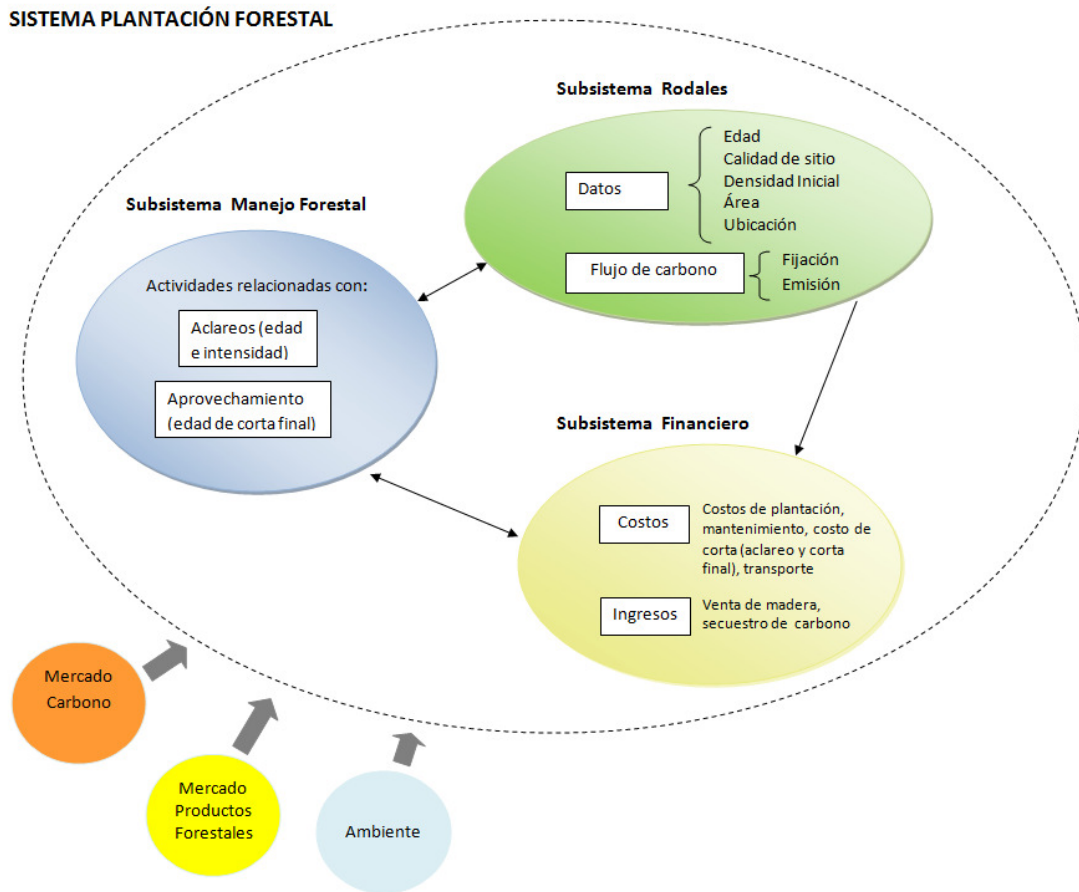


Figura 1.3. Representación del sistema asociado al modelo

Subsistema Rodales

Está conformado por todos los rodales que se encuentran en la plantación forestal. Cada rodal tiene ciertas características que lo definen: ubicación, densidad inicial, área, edad y calidad de sitio, esta última se define en función del área basal potencial que un rodal puede alcanzar. Se considera que los rodales son monoespecíficos, y que la especie que se encuentra plantada es *Tectona grandis* L.f. (teca). Los atributos de los rodales constituyen datos de entrada del modelo.

Puede decirse que el subsistema Rodales es el núcleo del sistema en estudio, ya que comprende la masa forestal cuyo manejo será planificado con ayuda del modelo. En este

subsistema ocurren varios procesos tales como crecimiento, mortalidad, competencia, respiración, fotosíntesis, flujo de carbono, entre otros.

De acuerdo con los objetivos planteados, en el modelo se incluyen los procesos de crecimiento, mortalidad y flujo de carbono. El crecimiento depende en primera instancia, de la calidad de sitio (efecto combinado de todos los factores del ambiente que influyen sobre el crecimiento de una especie, en un determinado lugar), y de otros factores como la competencia. Montero *et al.* (2001) señalan que el crecimiento en plantaciones de teca se ve influenciado por variables edáficas (características nutricionales, tanto del suelo como del follaje), fisiográficas (topografía) y climáticas (ej. temperatura, precipitación). También está documentado en la literatura que el manejo de la competencia a través de los aclareos, juega un papel muy importante en el crecimiento diamétrico en la teca (Pérez, 2005). En trabajos previos se han ajustado ecuaciones de crecimiento para plantaciones de teca venezolanas (Zambrano, 1993; Zambrano *et al.*, 1995), ecuaciones de volumen (Moret *et al.*, 1998), relaciones altura-diámetro (Zambrano *et al.*, 2001), entre otras, estas pueden ser utilizadas para conformar un modelo de crecimiento y rendimiento que se integre al modelo de optimización.

En el subsistema Rodales ocurren los procesos de fijación y emisión de carbono, los cuales se deben tomar en cuenta, ya que se desea que el modelo incorpore el secuestro de carbono como un objetivo de la plantación, conjuntamente con la producción de madera para aserrío. La fijación de carbono sucede mediante la absorción de CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis y su asimilación en biomasa. Los bosques recién plantados tienen muy poco carbono en la biomasa, conforme crecen acumulan biomasa, aumentando los depósitos de carbono en fustes, ramas, follaje y raíces. Una vez que los fustes son aprovechados se convierten en productos, en los cuales se queda almacenado parte del carbono que fue secuestrado (Ordoñez y Maser, 2001). Por su parte, las emisiones de carbono a la atmósfera ocurren por la descomposición de la biomasa debido a la mortalidad natural, a las actividades de aprovechamiento realizadas por el hombre y la degradación de los productos forestales (Hoen y Solberg, 1994).

El análisis de los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal puede hacerse a diferentes escalas, incluyendo pocos o muchos componentes del ciclo de carbono (Backéus *et al.*, 2005). En el sistema en estudio se considera el carbono secuestrado por la biomasa aérea y subterránea, y las emisiones que se producen debidas a la desintegración de la madera muerta, de los desechos de las cosechas y de los productos forestales cuando finaliza su vida útil.

Subsistema Manejo Forestal

Abarca el conjunto de prácticas silviculturales que permiten organizar la plantación para asegurar la producción de bienes y servicios, e incrementar su productividad. Se desea planificar las actividades de manejo relacionadas con la prescripción de aclareos y el aprovechamiento o corta final. Los aclareos consisten en la extracción de los árboles de forma y calidad baja, y se realizan con el fin de mejorar la provisión de nutrientes del suelo y de radiación solar a los árboles de mejores características; de esta manera, se concentra el potencial productivo del sitio en los árboles que quedan (Vincent, 1989). Todo ello posibilita que se obtengan árboles de mayor diámetro y de mejor forma. En la prescripción de los aclareos se requiere definir la edad y la intensidad en que éstos deben aplicarse para conseguir los objetivos previstos.

Por su parte, el aprovechamiento se refiere a la intervención de la plantación para extraer cosechas de madera y comprende las actividades relacionadas con la corta, procesamiento y extracción de trozas u otras partes aprovechables de los árboles para su posterior transformación. En el sistema en estudio se aborda el problema de la planificación de cortas, muy importante en el sector forestal y consiste en determinar cuándo, dónde y cuánta madera cortar para satisfacer los objetivos establecidos. Mediante estos planes se puede controlar variables como el volumen de inventario, tasas de crecimiento, flujo de caja, valor actual neto y retorno sobre la inversión, lo que puede conducir a un aumento en la rentabilidad de las empresas forestales (Buongiorno y Gilles, 1987). Con el modelo se busca determinar en qué año del período de planificación cada

rodal debe ser sometido a la corta final, para obtener una programación que se ajuste a los objetivos establecidos.

Subsistema Financiero

En este subsistema se consideran los diferentes costos involucrados en las actividades de manejo forestal, los ingresos provenientes de la producción de madera y el secuestro de carbono, y otras variables financieras tales como la tasa de interés. Se incluyen los costos de establecimiento y mantenimiento, costo de realizar las cortas (aclareo y corta final) y costo de transportar la madera a un sitio determinado para su posterior distribución. El objetivo es obtener un plan de cortas que maximice los beneficios, los cuales se pueden calcular como el valor actual neto (VAN) de los flujos de caja asociados a la producción de madera y el secuestro de carbono, durante el período de planificación.

Los diferentes subsistemas están interrelacionados, así por ejemplo, el subsistema Financiero se ve afectado por los procesos que ocurren en los demás subsistemas, ya que las actividades que se llevan a cabo ocasionan costos y determinan el tipo de productos a obtener, los cuales generarán ingresos. El subsistema Rodales y el subsistema Financiero influyen sobre el subsistema Manejo Forestal, ya que dependiendo de las características de los rodales y de los productos que se desean obtener (por lo general, aquellos que generan mayores beneficios) se diseñan los regímenes de manejo a utilizar. A su vez, el subsistema Manejo Forestal influye directamente en el subsistema Rodales, debido a que el régimen de manejo utilizado afecta las características del rodal (área basal, diámetro, volumen, densidad), así como también el secuestro de carbono en la plantación.

Por otra parte, en el entorno del sistema a modelar existen una serie de factores externos que influyen sobre este, tales como el ambiente, el cual puede afectar el crecimiento de los rodales; el mercado de productos forestales determina la demanda de materia prima y los precios de la madera; y el mercado del carbono fija el valor del secuestro de carbono.

1.4.3 Características del modelo

Se propone un modelo de optimización basado en un modelo de crecimiento y rendimiento, para determinar un plan de manejo para un conjunto de rodales de una plantación de teca. El modelo puede ubicarse en el nivel de planificación táctica, puesto que abarca los siguientes aspectos del manejo forestal:

1. Determinación del régimen óptimo de aclareo. El modelo permite encontrar regímenes óptimos de aclareo en rodales coetáneos y monoespecíficos (teca). Las decisiones que toma el modelo están relacionadas al número de aclareos, edad e intensidad en que deben aplicarse, de tal manera que se maximicen los beneficios económicos que pueden obtenerse del rodal. Esta parte del modelo tiene un enfoque a **nivel de rodal**, ya que comprende el desarrollo de un plan de manejo para un rodal específico.

2. Diseño de planes de aprovechamiento. El modelo establece una programación que indica los rodales de la plantación que serán cortados durante cada año del período de planificación y la intensidad de las cortas, con el objetivo de maximizar los beneficios provenientes de la producción de madera y del secuestro de carbono, considerando además que la plantación tiene una demanda anual de madera que debe ser satisfecha. El diseño de planes de aprovechamiento tiene una resolución a **nivel de bosque**. En la Figura 1.4 se muestra una representación gráfica del nivel de resolución del modelo.

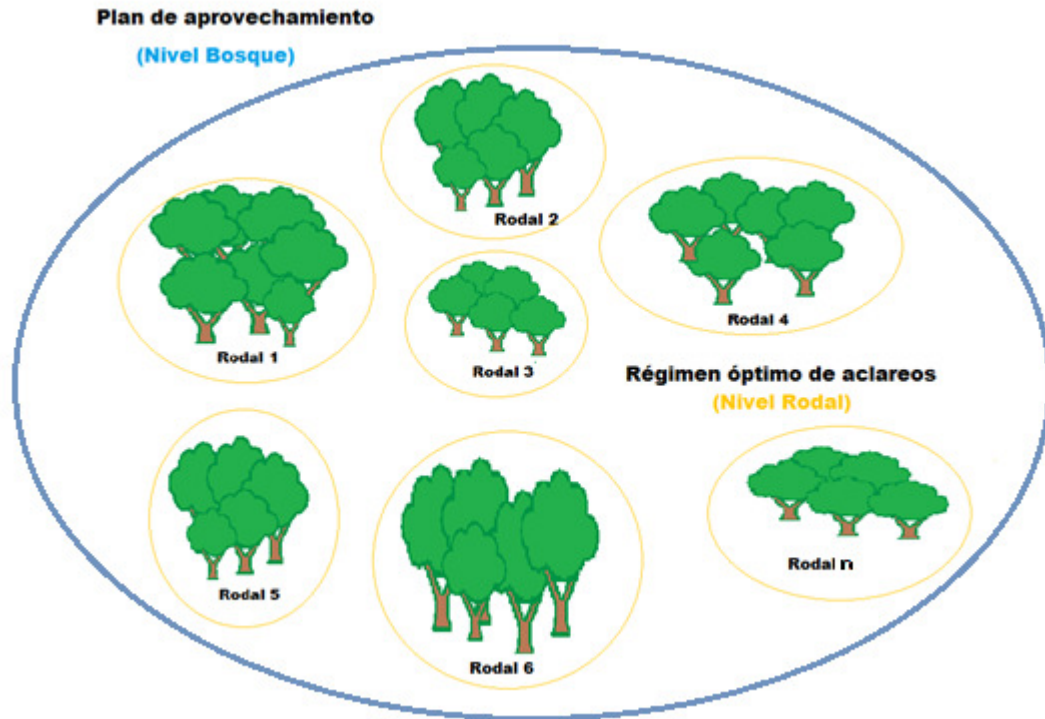


Figura 1.4. Representación gráfica del nivel de resolución del modelo

Para resolver el modelo fue necesario integrar los enfoques “nivel rodal” y “nivel bosque”. En principio se puede pensar que una forma de abordar el problema es conseguir el régimen óptimo de manejo para cada rodal de manera independiente y aplicarlo individualmente, esto permitiría establecer un plan de cortas para un horizonte de planificación que optimiza los beneficios que pueden obtenerse de cada uno de los rodales que conforman el bosque o unidad de producción forestal. Sin embargo, a este nivel, una sumatoria del régimen óptimo de cortas de los rodales individuales puede que no sea factible o no conduce al óptimo a nivel de bosque, ya que pueden existir objetivos y restricciones agregados que consideran diferentes rodales simultáneamente; por ejemplo, consideraciones espaciales, restricciones operativas que pueden limitar el aprovechamiento de varios rodales en un mismo año, cumplimiento de una demanda anual de madera, entre otros, como es el caso que se plantea en este estudio. Para

conectar los dos niveles de resolución “nivel rodal” y “nivel bosque”, se propone un modelo conformado por dos sub-modelos, los cuales se relacionan entre ellos (Figura 1.5).

Sub-Modelo1: modelo de optimización que determina regímenes de aclareo para un rodal. De acuerdo a las características particulares de un rodal como calidad de sitio, densidad de plantación, tasa de crecimiento, y considerando datos financieros, el modelo encuentra los mejores regímenes de aclareo para un rodal, en términos de los beneficios económicos obtenidos de la producción de madera y el secuestro de carbono. Este modelo se apoya en un modelo de simulación de crecimiento y rendimiento.

Sub-Modelo2: modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación. Este modelo de optimización considera todos los rodales conjuntamente y selecciona el régimen de aclareo a aplicar en cada rodal entre un conjunto de regímenes alternativos que son determinados por el primer modelo. En otras palabras, para cada rodal de la plantación, el modelo 1 busca cuáles son los mejores regímenes de aclareo, conformando de esta manera un conjunto de alternativas de manejo que se toma como entrada del modelo 2, el cual elige una de ellas para cada rodal, de tal manera que se optimicen los beneficios económicos de la plantación provenientes de la producción de madera y el secuestro de carbono, y se satisfaga la demanda anual de madera. Además, el modelo de planificación del aprovechamiento determina el año en el que debe efectuarse la corta final de cada rodal (turno).

Se utilizaron métodos heurísticos para resolver tanto el modelo de aclareos como el modelo de aprovechamiento, por ser los más indicados para manejar la complejidad que se origina al incorporar funciones no lineales, un número elevado de variables y una gran cantidad de alternativas de solución posibles.

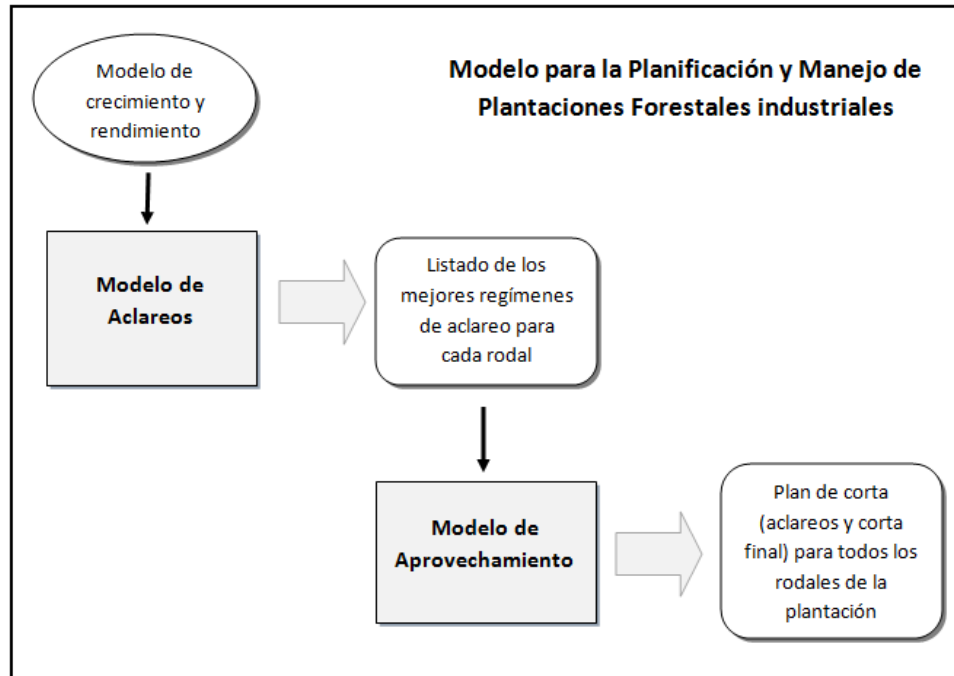


Figura 1.5. Estructura del modelo de la tesis

1.5 Organización de la tesis

La tesis consta de seis capítulos, cada uno de los cuales trata un aspecto particular del problema en estudio y plantea el desarrollo de un modelo como estrategia de solución. Este primer capítulo es introductorio y brinda una visión general del problema que se aborda en la investigación y del modelo desarrollado. En el capítulo II se hace una evaluación de tres de las técnicas heurísticas más utilizadas en planificación forestal, aplicadas a un problema de planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales de *Eucalyptus*, el cual también puede ser resuelto por Programación Entera Binaria ya que su estructura y tamaño lo permiten. El objetivo fue medir el desempeño de algunas heurísticas y hacer comparaciones con respecto a un método exacto, para decidir cuáles de ellas utilizar en el modelo planteado en este trabajo. En el capítulo III se presenta el modelo de optimización a nivel de rodal para prescribir regímenes de aclareos, desarrollado para la especie forestal *Tectona grandis* L.f. (teca), el cual integra también un

modelo de crecimiento y rendimiento. El capítulo IV corresponde a una versión diferente del modelo de optimización de aclareos, la cual incluye el secuestro de carbono como otro objetivo del manejo forestal. El capítulo V describe el modelo de aprovechamiento a nivel de bosque desarrollado para plantaciones teca y objeto de esta tesis doctoral, el cual se apoya en los modelos a nivel de rodal presentados en los capítulos III y IV, y en un modelo de crecimiento y rendimiento. Cada uno de estos capítulos está organizado de manera tal que se exponen los fundamentos teóricos más importantes, antecedentes, materiales, métodos, análisis de resultados y conclusiones. Finalmente, en el capítulo VI se presentan las conclusiones generales del trabajo y las recomendaciones.

1.6 Referencias

- Aguilar L, López B, Pérez R (1985) *Establecimiento de parcelas permanentes de aclareo y rendimiento para teca (Tectona grandis) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Ticoporo, Estado Barinas*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela. 41 pp.
- Andalaft N, Andalaft P, Guignard M, Magendzo A, Wainer A, Weintraub A (2003) A problem of forest harvesting and road building solved through model strengthening and Lagrangean relaxation. *Operations Research* 51(4): 613-628.
- Anderson D, Bare, B (1994) A dynamic programming algorithm for optimization of uneven-aged forest stands. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1758-1765.
- Arp PA, Lavigne DR (1982) Planning with goal programming: a case study for multiple-use of forested land. *The forestry Chronicle* 75: 497 – 504.
- Asante P, Armstrong GW, Adamowicz WL (2011) Carbon sequestration and the optimal harvest decision: A dynamic programming approach considering biomass and dead organic matter. *Journal of Forest Economics* 17: 3-17.
- Backéus S, Wikström P, Lämås T (2005) A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production. *Forest Ecology and Management* 216: 28-40

- Baskent EZ (2001) Combinatorial Optimization in Forest Ecosystem Management Modeling. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 25: 187 – 194.
- Baskent EZ, Jordan GA (2002) Forest landscape management modeling using simulated annealing. *Forest Ecology and Management* 165: 29-45.
- Baskent EK, Keles S (2009) Developing alternative forest management planning strategies incorporating timber, water and carbon values. *Environmental modeling and assessment*: 14: 467-480.
- Bertomeu M, Diaz-Balteiro L, Giménez JC (2009) Forest management optimization in Eucalyptus plantations: a goal programming approach. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 356-366.
- Betances M (1986) *Estimación de volumen a partir del área basal en plantaciones de teca (Tectona grandis L.f.) Reserva Forestal de Caparo*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Cuaderno Comodato ULA-MARNR 8. Mérida, Venezuela. 34 pp.
- Bettinger P, Boston K, Kim HY, Zhu Y (2007) Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions. *European Journal of Operational Research* 176(2): 1265-1282.
- Bettinger P, Boston K, Siry JP, Grebner DL (2009 a) *Forest Management and Planning*. Academic Press, Elsevier. San Diego, EEUU. 331 pp.
- Bettinger P, Chung W (2004) The key literature of, and trends in, forest-level management planning in North America, 1950-2001. *International Forest Review* 6: 40-50.
- Bettinger P, Graetz D, Boston K, Sessions J, Chung W (2002) Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica*. 36(2): 561-584.
- Bettinger P, Graetz D, Sessions J (2005) A density-dependent stand-level optimization approach for deriving management prescriptions for interior northwest (USA) landscapes. *Forest Ecology and Management* 217: 171-186.
- Bettinger P, Johnson DL, Johnson KN (2003) Spatial forest plan development with ecological and economic goals. *Ecological Modelling* 169: 215-236.

- Bettinger P, Sessions J, Boston K (2009 b) A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning. *International Journal of Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences* 1: 26-37.
- Boston K, Bettinger P (1999) An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. *Forest Science* 45(2): 292-301.
- Boston K, Bettinger P (2002) Combining tabu search and genetic algorithm heuristic techniques to solve spatial harvest scheduling problems. *Forest Science* 48: 35-46.
- Boston K, Bettinger P (2006) An economic and landscape evaluation of the green-up rules for California, Oregon, and Washington (USA). *Forest Policy and Economics* 8(3): 251-266.
- Brumelle S, Granot D, Helme M, Vertinsky I (1998) A tabu search algorithm for finding good forest harvest schedules satisfying green-up constraints. *European Journal of Operational Research* 106: 408-424.
- Buongiorno J, Gilless JK (1987) *Forest Management and Economics. A Primer in Quantitative Methods*. Macmillan Publishing Company. Nueva York. 287 pp.
- Chakraborti SK, Gaharwar KS (1995) A study on volume estimation for indian teak. *Indian forester* 121 (6): 503-509.
- Chaturvedi AN (1995) The viability of commercial teak plantation projects. *Indian forester* 121 (6): 550-552.
- Chen BW, Gadow vK (2002) Timber harvest planning with spatial objectives, using the method of simulated annealing. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121: 25-34.
- Chen BW, Gadow vK (2008) Combining spatial and other objectives in forest design. *Forestry Studies* 48: 30-40.
- Chiari RJ (2005) *Modelo preliminar para la planificación del aprovechamiento de plantaciones forestales*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 106 pp.

- Chikumbo O, Straka, T (2012) Maintaining an Optimal Flow of Forest Products under a Carbon Market: Approximating a Pareto Set of Optimal Silvicultural Regimes for *Eucalyptus fastigata*. *Open Journal of Forestry* 2:138-149.
- Chikumbo O, Nicholas I (2011) Efficient thinning regimes for *Eucalyptus fastigata*: multi-objective stand-level optimisation using the island model genetic algorithm. *Ecological Modelling* 222(10): 1683–1695.
- Clements SE, Dallain PL, Jamnick MS (1990) An operational, spatially constrained harvest scheduling model. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 1438-1447.
- Clutter JL, Forson JC, Pienaar LV, Brister GH y Bailey RL (1983) *Timber Management: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons. Nueva York, EEUU. 333 pp.
- Crowe K, Nelson J (2003) An indirect search algorithm for harvest-scheduling under adjacency constraints. *Forest Science* 49(1): 1-11.
- Crowe K, Nelson J (2005) An evaluation of the simulated annealing algorithm for solving the area-restricted harvest-scheduling model against optimal benchmarks. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2500-2509.
- Crowe K, Nelson J, Boyland M (2003) Solving the area-restricted harvest-scheduling model using the branch and bound algorithm. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1804-1814.
- Dahlin B, Sallnas O (1993) Harvest scheduling under adjacency constraints - A case study from the Swedish sub - alpine region. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8: 281 - 290.
- Dane CW, Meador NC y White JB (1977) Goal programming in land-use planning. *Journal of Forestry* 75(6):325 - 329.
- Daust DK, Nelson JD (1993) Spatial reduction factors for strata-based harvest schedules. *Forest Science* 39:152–165.
- Davis LS, Johnson N, Bettinger P, Howard T (2001) *Forest management: to sustain ecological, economic, and social values*. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 804 pp.

- De Kluyver CA, Daellenbach HG, Whyte GD (1980) A two-stag, multiple objective mathematical programming approach to optimal thinning and harvesting. *Forest Science* 26: 674-686.
- Díaz AD, Ferland JA, Ribeiro CC, Vera JR, Weintraub A (2007) A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. *European Journal of Operational Research* 179(3): 788-805.
- Díaz-Balteiro L, Gonzalez-Pacho J, Romero C (2009) Forest management with multiple criteria and multiple stakeholders: an application to two public forests in Spain. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24: 87-93.
- Díaz-Balteiro L, Romero C (1998) Modeling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: an application in Spain. *Forest Science* 44: 47-57.
- Dréo J, Pétrowski A, Siarry P, Taillard E (2006) *Metaheuristics for hard Optimization*. Springer - Verlag, Berlín, Alemania.
- Ducheyne E, De Wulf R, De Baets B (2004) Single versus multiple objective genetic algorithms or solving the even-flow forest management problem. *Forest Ecology and Management* 201: 259-273
- Epstein R, Weintraub A, Sapunar P, Nieto E, Sessions JB, Sessions J, Bustamante F, Musante H (2006) A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. *Operations Research* 54(6): 1017-1027.
- Eyvindson K. (2012) Balancing equity and efficiency of goal programming for use in forest management planning. *Canadian Journal of Forest Research*. En prensa.
- Falcão AO, Borges JG (2002) Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. *Forest Science* 48:608-621.
- Falcão AO, Borges JG (2003) Heurísticas para a integração de níveis estratégico e operacional da gestão florestal em problemas de grande dimensão. *Scientia forestales* 63: 94-102.

- Field C, Dress E y Fortson C (1980) Complementary linear and goal programming procedures for timber harvest scheduling. *Forest Science* 26(1): 121 – 133.
- Field DB (1973) Goal programming for forest management. *Forest Science* 19: 125 – 135.
- Flisberg P, Lidén B, Rönnqvist M (2009) A hybrid method based on linear programming and tabu search for routing of logging trucks. *Computers & Operations Research* 36: 1122-1144.
- Fonseca TF, Cerveira A, Mota A (2012) An integer programming model for a forest harvest problema in *Pinus pinaster* stands. *Forest Systems* 21: 272-283.
- Fonseca W (2004) *Manual de productores de teca (Tectona grandis L. f) en Costa Rica*. Heredia, Costa Rica. [documento en línea]. Disponible desde Internet en: www.fonafifo.com/text_files/proyectos/ManualProductoresTeca.pdf [con acceso el 25-03-2012].
- Fotakis DG, Sidiropoulos E, Myronidis D, Ioannou K (2012) Spatial genetic algorithm for multi-objective forest planning. *Forest Policy and Economics* 21: 12-19.
- Frisk M, Göthe-Lundgren M, Jörnsten K, Rönnqvist M (2010) Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research* 205: 448-458.
- Frombo F, Minciardi R, Robba M, Rosso F, Sacile R (2009) Planning woody biomass logistics for energy production: A strategic decision model. *Biomass and bioenergy* 33; 372-383.
- Gómez T, Hernández M, Molina J, León MA, Aldana E, Caballero R (2011) A multiobjective model for forest planning with adjacency constraints. *Annals of Operations Research* 190 (1): 75-92.
- Gomide LR, Arce JE, da Silva ACL (2009) Using genetic algorithm in forest planning considering its selection operators. *Cerne* 15(4): 460-467.
- González-Olabarria JR, Pukkala T (2011) Integrating fire risk considerations in landscape-level forest planning. *Forest Ecology and Management* 261: 278-287.
- Goycoolea M, Alan M, Vielma JP, Weintraub A (2009) Evaluating Approachs for solving the area restriction model in harvest scheduling. *Forest Science* 55:149-165.

- Gunn EA (2007) Models for strategic forest management. In: Weintraub A, Romero C, Bjørndal T, Epstein R (Eds.). *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, pp 317-341. Springer. Nueva York, EEUU.
- Heinonen T, Pukkala T (2004) A comparison of one- and two-compartment neighbourhoods in heuristic search with spatial forest management goals. *Silva Fennica* 38: 319-332.
- Hillier FS, Lieberman GJ (2001) *Introduction to Operations Research*. Séptima edición. Mc Graw Hill. Nueva York. 1204 pp.
- Hoganson HM, Borges JG (1998) Using dynamic programming and overlapping subproblems to address adjacency in large harvest scheduling problems. *Forest Science* 44: 526-538.
- Jamnick MS, Walters KR (1993) Spatial and temporal allocation of stratum-based harvest schedules. *Canadian Journal of Forest Research* 23(3): 402-413.
- Jerez M, Vincent L, Moret A, González R (2003) *Regímenes de espaciamiento inicial y aclareo en plantaciones de teca en Venezuela*. Seminario y Grupo de Discusión Virtual en Teca (*Tectona grandis* L.), Heredia, Costa Rica, Noviembre 26-28, 2003. [documento en línea]. Disponible en Internet en: <www.una.ac.cr/inis/docs/teca/temas/RegmenesdEspaciamiento1.pdf> [con acceso el 03-02-2012].
- Jerez M (2008) *Simulación del crecimiento y rendimiento para plantaciones de teca (Tectona grandis Linn.) de los Llanos Occidentales de Venezuela*. Proyecto de investigación presentado ante el CDCHTA-UULA, para solicitar financiamiento. 33 pp.
- Kangas J, Pukkala T (1992) A decision theoretic approach applied to goal programming of forest management. *Silva Fennica* 26(3): 169-176.
- Keogh RM (1979) El futuro de la teca en América tropical. *Unasylva* 31: 13-19.
- Krcmar EB, Stennes G, Kooten Cv, Vertinsky I (2001) Carbon sequestration and land management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. 135(3): 616-629.

- Lockwood C, Moore T (1993) Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 468-478.
- Li L, Guo-liang L, Shao-zhi C, Chu-ping T (2011) Multiple functions-targeted algorithms and potential applications of Forest Simulation Optimization System (FSOS). *Yingyong Shengtai Xuebao* 22 (11): 3067-72.
- Liu G, Han S, Zhao X, Nelson JD, Wang H, Wang W (2006) Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning. *Ecological Modelling* 194: 421-428.
- Lu F, Eriksson O (2000) Formation of harvest units with genetic algorithms. *Forest Ecology and Management* 130: 57-67.
- Mäkinen A (2009) *Uncertainty in forest simulators and forest planning systems*. Dissertationes Forestales 97. Department of Forest Resource Management, Faculty of Forestry and Agriculture, University of Helsinki. Helsinki, Finlandia. 38 p.
- Martell DL, Gunn EA, Weintraub A (1998) Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research* 104: 1-17.
- Martí R (2003) Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. *Matemàtiques* 1 (1): 3-62.
- Martins I, Constantino M, Borges JG (2005) A column generation approach for solving a non-temporal forest harvest model with spatial structure constraints. *European Journal of Operational Research* 161(2): 478-498.
- Melián B, Moreno JA, Moreno JM (2003) Metaheurísticas: Una visión global. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 19(2): 7-28.
- Ministerio del Poder Popular para el ambiente (2010) Anuario Estadísticas Forestales serie 12 2008. Gobierno Bolivariano de Venezuela. Caracas, Venezuela. 178 pp.
- Montero M, Ugalde L, Kanninen M (2001). Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana* 35: 13-18.
- Moret AY, Jerez M, Mora A (1998) Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la Reserva

- Forestal Caparo, Estado Barinas – Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.
- Murray A, Church R (1995) Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. *Operation Research Spektrum* 17: 193 – 203.
- Nalle D J, Montgomery CA, Arthur JL, Polasky S, Schumaker NH (2004) Modeling joint production of wildlife and timber. *Journal of Environmental Economics and Management* 48(3): 997-1017.
- Nelson J, Brodie JD (1990) Comparison of a random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 101-122.
- Nelson, J, Brodie JD, Sessions J (1991) Integrating short-term, area-based logging plans with long term harvest schedules. *Forest Science* 37: 101-122.
- O'Hara AJ, Faaland BH y Bare BB (1989) Spatially constrained timber harvest scheduling. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 715 – 724.
- Öhman K, Edenius L, Mikusinski G (2011) Optimizing spatial habitat suitability and timber revenue in long-term forest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 543-551.
- Öhman K, Eriksson LO (2010) Aggregating harvest activities in long term forest planning by minimizing harvest area perimeters. *Silva Fennica* 44(1): 77-89.
- Öhman K, Seibert J, Laudon H (2009) An approach for including consideration of stream water dissolver organic carbon in long term forest planning. *Ambio* 38: 387- 393.
- Öhman K, Wikström P (2008) Incorporating aspects of habitat fragmentation into longngtermforest planning using mixed integer programming. *Forest Ecology and Management* 255: 440-446.
- Osorio O. 1997. *Regímenes de espesura y sus efectos en la rentabilidad de teca (Tectona grandis L.f) en Caparo, Venezuela*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 98 pp.

- Palahí M, Pukkala T (2004) *Métodos de optimización heurística para la resolución de modelos de planificación forestal* [documento en línea]. Disponible desde Internet en:
<www.medforex.net/papers/forest/palahí-pukkala2.pdf> [con acceso el 13-04-12].
- Palahí M, Pukkala T, Pérez E, Trasobares A (2004) Herramientas de soporte a la decisión en la planificación y gestión forestal. Presentación del Sistema de Planificación MONTE. *Divulgación* 78: 40-48.
- Pérez LD (2005) *Stand growth scenarios for Tectona grandis plantations in Costa Rica*. Academic dissertation. University of Helsinki. 77 pp.
- Pukkala T (2009) Population-based methods in the optimization of stand management. *Silva Fennica* 43(2): 261-274.
- Pukkala T, Heinonen T (2006) Optimizing heuristic search in forest planning. *Nonlinear analysis: real world applications* 7(5): 1284 – 1297.
- Pukkala T, Kangas J (1993) A heuristic optimization method for forest planning and decision making. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8(4): 560-570.
- Pukkala T, Kurttila M (2005) Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica* 39: 67 – 80.
- Quintero MA, Jerez M, Ablan M (2010). Métodos Heurísticos en la Planificación del Manejo Forestal: Un Ejemplo de Aplicación. *Revista Forestal Venezolana* 54(2): 183- 194.
- Quintero MA, Jerez M, Ablan M (2011a) Evaluación de tres técnicas heurísticas para resolver un modelo de planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales. *Interciencia* 36 (5): 348-355.
- Quintero MA, Jerez M, Ablan M (2011 b) Planificación del Aprovechamiento Forestal utilizando Algoritmos Genéticos. *Revista Forestal Venezolana* 55(1): 29-39.
- Raymer AK, Gobakken T, Solberg B, Hoen HF, Bergseng E (2009) A forest optimisation model inclusion carbon flows: Application to a forest in Norway. *Forest Ecology and Management* 258: 579-589.

- Reeves CR (1996) Modern Heuristic Techniques. In: Rayward-Smith VJ, Osman IH, Reeves CR, Smith GD (Eds.), *Modern Heuristic Search Methods*. Jon Wiley & Sons. Chichester, Inglaterra. pp 1- 25.
- Richards EW, Gunn E (2000) A Model and tabu search method to optimize stand harvest and road construction schedules. *Forest Science* 46: 188-203.
- Richards EW, Gunn E (2003) Tabu search design for difficult forest management optimization problems. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1126-1133.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, De Souza AL (2003) Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando Busca Tabu. *Árvore* 27: 701-713.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, De Souza AL, Silva GF (2004a) Metaheurística algoritmo genético para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árvore* 28: 233-245.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, De Souza AL, Silva GF (2004b) Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árvore* 28: 247-256.
- Seo JH, Vilčko F, Sánchez S, Kunth S, Son YM, Von Gadow K (2005) A case study of forest management planning using a new heuristic algorithm. *Tree Physiology* 25: 929 – 938.
- Session J, Bettinger P, Murphy G (2007) Heuristics in forest planning. In: Weintraub A, Romero C, Bjørndal T, Epstein R (Eds.). *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, pp 431-448. Springer. Nueva York, EEUU.
- Tan J (2000) Application of Dynamic Programming to Optimum Location of a Forest Road. *Journal of Forest Engineering* 11:33-42.
- Tarp P, Helles F (1997) Spatial optimization by simulated annealing and linear programming. *Scandinavian Journal of Forest Research* 12: 390-402.
- Thompson MP, Hamann JD, Sessions J (2009) Selection and Penalty Strategies for Genetic Algorithms Designed to Solve Spatial Forest Planning Problems. *International*

- Journal of Forestry Research* (2009), Article ID 527392, 14 pages.doi:10.1155/2009/527392
- Toncoso JJ, Garrido RA (2005) Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming. *Forest Policy and Economics* 7: 625-633.
- Troncoso J (2002) Modelos de Planificación Forestal Orientados a la producción y Logística. *Agronomía y Forestal UC* 15: 15 – 18.
- Turland J (2007) *An overview of north american forest modeling approaches and technology and their potential application to Australian native forest management*. World Forest Institute Oregon. Oregon, EEUU. 140 p.
- Vaclav E, Skoupy J (1972) Growing of teak (*Tectona grandis* L.f.) in Blangadesh. *Silvaecultura Tropica et Subtropica* 2: 11-28.
- Van Deusen PC (1999) Multiple solution harvest scheduling. *Silva Fennica* 33(3): 207–216.
- Vanclay JK (1994) *Modeling forest growth and yield, Applications to mixed tropical forests*. CAB International. Reino Unido. 312 pp.
- Valera L, Garay V, Dulhoste R (2001) Variación en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en la Reserva Forestal Ticoporo, Venezuela. Base para un programa de mejora. *Revista Forestal Venezolana* 45(2): 145 – 152.
- Vargas B, Corral J, Cruz F, Aguirre O, Nagel J (2008) Uso y aplicación de los simuladores de crecimiento forestal en la toma de decisiones silviculturales. *Revista Forestal Latinoamericana* 23(2): 929 – 938.
- Vielma JP, Murray AT, Ryan DM, Weintraub A (2007) Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. *European Journal of Operational Research* 176(2): 1246-1264.
- Walker HD, Preiss SW (1988) Operational Planning Using Mixed Integer Programming. *The Forestry Chronicle* 64: 485-488.
- Weaver PL (2000) *Tectona grandis* L.f. Teca. In: Francis JK, Lowe CA (Eds.). *Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las indias occidentales*, pp 524-540.

- Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), International Institute of Tropical Forestry. Río Piedras, Puerto Rico.
- Weintraub A, Jones G, Magendzo A, Meacham M, Kirby M (1994). A heuristic system to solve mixed-integer forest planning models. *Operations Research* 42(6): 1010-1024.
- Weintraub, A, Magendzo A, Magendzo A, Malchuk D, Jones G, Meacham M (1995) Heuristic procedures for solving mixed-integer harvest scheduling—transportation planning models. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1618-1626.
- Wikström P, Eriksson LO (2000) Solving the stand management problem under biodiversity-related considerations. *Forest ecology and management* 126(3): 361-376.
- Yoshimoto A, Brodie JD, Sessions J (1994) A new heuristic to solve spatially constrained longterm harvest scheduling problems. *Forest Science* 40(3): 365-396.
- Zambrano T (1993) *Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (Tectona grandis Linn)*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 147pp.
- Zambrano T, Jerez M, Vincent L (1995) Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectona grandis* L.) *Revista Forestal Venezolana* 39 (1): 40-48.
- Zambrano T, Suárez M, Jerez M (2001) Evaluación de la efectividad del ajuste de algunos modelos de regresión utilizados para estimar la relación altura-diámetro en parcelas permanentes de rendimiento y aclareo en teca (*Tectona grandis* Linn). *Revista Forestal Venezolana* 45(2): 163-173.
- Zeng HC, Pukkala T, Peltola H (2007a) The use of heuristic optimization in risk management of wind damage in forest planning. *Forest Ecology and Management* 241(1-3):189-199.
- Zeng HC, Pukkala T, Peltola H, Kellomaki S (2007b) Application of ant colony optimization for the risk management of wind damage in forest planning. *Silva Fennica* 41(2): 315-332.

Zhu J, Bettinger P (2008) Assessment of three heuristics for developing large-scale spatial forest harvest scheduling plans. *Journal of Applied Sciences* 8: 4113-4120.

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE TRES TÉCNICAS HEURÍSTICAS PARA RESOLVER UN MODELO DE PLANIFICACIÓN DEL APROVECHAMIENTO EN PLANTACIONES FORESTALES INDUSTRIALES

2.1 Introducción

La planificación de las actividades forestales comprende un conjunto de decisiones referentes a la selección de los regímenes de manejo a utilizar, el diseño de planes de corta, la programación de trabajos en el campo y otros aspectos estratégicos, tácticos y operacionales, para asegurar el cumplimiento de los objetivos establecidos. Tal como se mencionó en el capítulo I, la elaboración de planes de manejo forestal puede abordarse mediante técnicas de programación matemática (ej. Programación Lineal, Programación Dinámica, Programación no Lineal), las cuales son de gran ayuda puesto que permiten optimizar el uso de los recursos y facilitan la evaluación de diferentes escenarios. La principal ventaja de utilizar técnicas de programación matemática clásicas es que puede garantizarse que los resultados obtenidos corresponden a la solución óptima del modelo, además existe una gran cantidad de software de optimización que cuenta con algoritmos contrastados y de propósito general desarrollados para encontrar soluciones. No obstante, cuando el problema tiene un alto grado combinatorio, estas técnicas presentan limitaciones: los algoritmos no pueden encontrar la solución óptima o requieren de un tiempo de computación muy alto (Dréo *et al.*, 2006).

Esta situación puede presentarse en los problemas de planificación de cortas; estos usualmente se modelan usando variables binarias, ya que asignan tratamientos a diferentes unidades de manejo o rodales, y aunque algunas instancias del problema pudieran ser resueltas eficientemente con técnicas de programación matemática, si su tamaño aumenta, por ejemplo, agregando mayor cantidad de rodales, incrementando el número de restricciones o prolongando el período de planificación, la habilidad de los algoritmos exactos para resolverlo se ve comprometida (Bettinger *et al.*, 2009). En

diversas investigaciones se ha demostrado que algunos problemas de planificación del aprovechamiento forestal pueden ser considerados difíciles de resolver, y que para encontrar una solución deben emplearse otras técnicas diferentes a la programación matemática, pueden citarse los trabajos de Lockwood y Moore (1993), Dahlin y Sallnas (1993), Boston y Bettinger (1999), McDill y Braze (2001), Murray y Weintraub (2002).

Otros problemas de difícil solución en planificación forestal son los que tienen un enfoque multiobjetivo, en ellos se busca optimizar varios objetivos en forma simultánea, como por ejemplo beneficios económicos, conservación de la biodiversidad, fijación de carbono, protección del suelo, regulación de recursos hídricos y recreación; también son complejos los problemas de transporte forestal y los que incluyen un conjunto de restricciones espaciales relacionados a la forma, ubicación y yuxtaposición de las unidades de manejo. Para abordar este tipo de problemas, se puede hacer uso de técnicas heurísticas como un enfoque alternativo a los métodos de programación matemática tradicionales.

Las técnicas heurísticas son procedimientos de solución conformados por una regla o conjunto de reglas, que buscan buenas soluciones de una manera sencilla y rápida. Estas técnicas han sido especialmente utilizadas en problemas difíciles de resolver, demostrando que pueden encontrar buenas soluciones en forma mucho más rápida que los métodos de programación matemática, razón por la cual se prefieren para la resolución práctica de un problema (Voß, 2001).

El destacable éxito de los métodos heurísticos para tratar problemas de optimización complejos ha causado un creciente interés y una cantidad considerable de nuevas aplicaciones durante los últimos años, entre las que se encuentran algunas experiencias en el sector forestal. Tres de las heurísticas que se han destacado en la solución de problemas de planificación forestal complejos son el Recocido Simulado (Lockwood y Moore, 1992; Tarp y Helles, 1997; Rodrigues *et al.*, 2004b; Crowe y Nelson, 2005, Chen y Gadow, 2008); Búsqueda Tabú (Bettinger *et al.*, 1997, 2007; Brumelle *et al.*, 1998, Richards y Gunn, 2000, 2003; Rodrigues *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2007); y Algoritmos

Genéticos (Lu y Eriksson, 2000; Falcão y Borges ,2001; Ducheyne *et al.*,2004; Rodrigues *et al.*, 2004a; Thompson *et al.*, 2009). En la literatura también pueden encontrarse trabajos en los que se hacen comparaciones entre distintas heurísticas para tratar problemas de planificación forestal, destacando las investigaciones de Boston y Bettinger (1999), Bettinger *et al.* (2002), Falcão y Borges (2002), Palahí *et al.* (2004), Heinonen y Pukkala (2004), Pukkala y Kurttila (2005), Liu *et al.* (2006), Zhu y Bettinger (2008).

En este capítulo se utilizan las técnicas heurísticas Recocido Simulado, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos para resolver un problema de planificación del cosechas en plantaciones forestales industriales, en el cual se busca obtener una secuencia de cortas para un conjunto de rodales durante un período de planificación de siete años, minimizando los costos totales de aprovechamiento y considerando algunas restricciones operativas. El objetivo fue evaluar el desempeño de algunas heurísticas en la resolución de un problema de planificación del aprovechamiento forestal, en términos del tiempo de computación utilizado y la calidad de la solución encontrada. Para ello, se desarrollaron tres algoritmos, cada uno basado en uno de los métodos heurísticos antes mencionados. Se realizaron un conjunto de corridas cuyos resultados permitieron calcular estadísticas para distintas variables de desempeño. Las soluciones generadas por los algoritmos heurísticos fueron comparadas con la solución óptima del problema, la cual se obtuvo al resolver el modelo mediante Programación Entera Binaria. Los resultados obtenidos fueron de gran ayuda, ya que proporcionaron una guía al momento de decidir cuáles métodos heurísticos utilizar para resolver el modelo de aprovechamiento forestal planteado en esta tesis doctoral.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Formulación del problema

El problema consiste en cómo planificar un sistema de cortas para una unidad de producción forestal que permita abastecer de madera en forma continua a una planta de

pulpa para la producción de cartón, de manera tal que se minimicen los costos totales de aprovechamiento. Se trata de plantaciones de Eucalyptus (*E. urophylla*, *E. grandis*, *E. xurograndis*) dispuestas en 20 rodales.

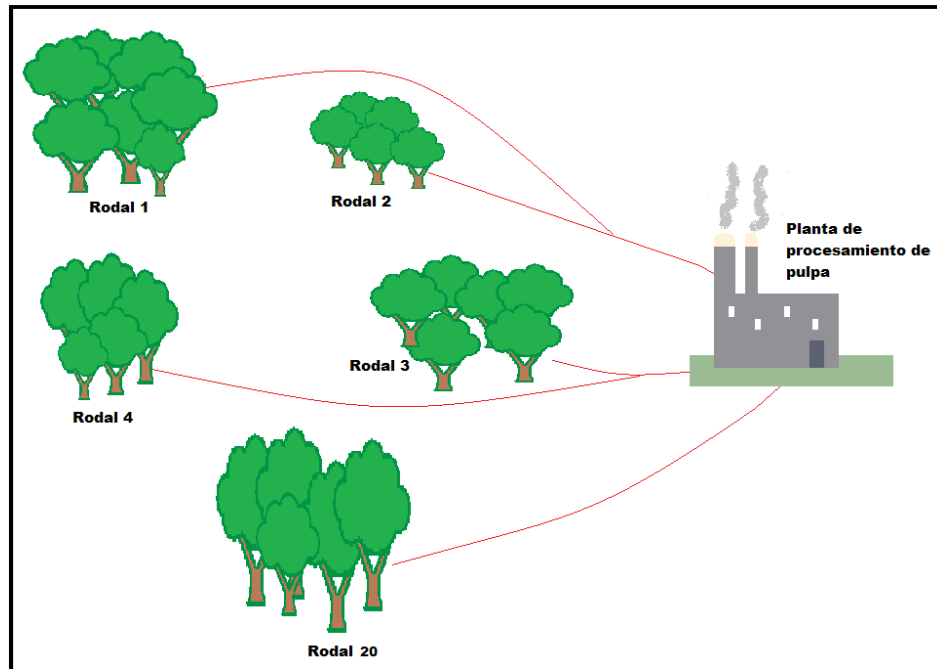


Figura 2.1. Representación gráfica del problema

De cada rodal se conoce su superficie (ha), la curva de incremento medio anual del volumen aprovechable (IMA en $\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}$) y la edad en años (Tabla 2.1). El turno mínimo para la corta de un rodal es a los seis años y el turno óptimo a los siete años. A partir de la información básica de los rodales se calculó el volumen de madera disponible en cada rodal para cada año. El aprovechamiento anual de madera puede realizarse en uno o varios rodales simultáneamente, buscando cubrir la demanda de la planta de procesamiento, fijada en $90.000 \text{ t año}^{-1}$. Se considera que un rodal sólo puede ser aprovechado una vez durante el período de planificación o también pudiera no ser aprovechado.

Los costos totales de aprovechamiento en un año particular incluyen costo de cosecha, costo de transportar la madera desde los diferentes rodales aprovechados hasta la planta

y costo de oportunidad, referido este último a la cantidad de dinero que se dejaría de ganar si se corta un rodal en un año distinto al turno óptimo. El costo de cosecha se asumió constante para todos los rodales y los costos de transporte dependen de la distancia de cada rodal a la planta. Se utilizaron los costos de oportunidad calculados por Chiari et al. (2008), quienes emplearon un enfoque de comparación de alternativas financieras. El objetivo es obtener un plan de aprovechamiento de costo mínimo que indique qué rodales se deben cortar en cada año de un horizonte de planificación de siete años para cubrir las necesidades de materia prima de la planta.

Tabla 2.1. Datos básicos de los rodales

Rodal	Edad (años)	Área (ha)	IMA ($m^3ha^{-1}año^{-1}$)
1	6	245	24
2	7	78	27
3	2	315	28
4	8	958	8
5	7	305	15
6	3	340	15
7	2	134	15
8	6	507	10
9	4	276	14
10	3	171	14
11	2	175	14
12	2	154	23
13	8	156	19
14	5	310	22
15	4	385	22
16	2	98	29
17	1	336	29
18	9	528	16
19	9	528	16
20	9	528	16

2.2.2 Modelo matemático

Se planteó un modelo de optimización restringida, cuya función objetivo representa la minimización del costo total de aprovechamiento en el que se incurre durante todo el horizonte de planificación:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{20} \sum_{j=1}^7 C_{ij} X_{ij} \quad [2.1]$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^{20} V_{ij} X_{ij} \geq 90000 \quad j = 1, 2, \dots, 7 \quad [2.2]$$

$$\sum_{j=1}^7 X_{ij} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, 20 \quad [2.3]$$

$$X_{ij} = (0, 1) \quad i = 1, 2, \dots, 20 ; j = 1, 2, \dots, 7 \quad [2.4]$$

donde C_{ij} es el costo total de aprovechamiento (costo de cosecha + costo de transporte + costo de oportunidad) si se corta el rodal i en el año j ; X_{ij} es una variable de decisión binaria cuyo valor es igual a 1 si se corta el rodal i en el año j , y vale 0 en caso contrario; y V_{ij} es el volumen total (toneladas) presente en el rodal i el año j .

Las restricciones [2.2] obligan a satisfacer la demanda anual de volumen de madera de la planta; el grupo de inecuaciones [2.3] corresponde a las restricciones de singularidad e indican que un rodal sólo puede ser cortado en un año del horizonte de planificación; y las restricciones [2.4] señalan que las variables de decisión del modelo son binarias.

La solución óptima del modelo se obtuvo mediante Programación Entera Binaria para lo cual se utilizó el algoritmo de ramificación y acotamiento provisto en SAS OR (SAS, 2004).

2.2.3 Técnicas de optimización utilizadas

Programación Entera Binaria

Para tener una referencia acerca de cuál es la solución óptima del problema y poder evaluar la eficiencia de los algoritmos heurísticos, se resolvió el modelo utilizando una técnica de programación matemática, específicamente Programación Entera Binaria. Esta técnica de optimización se deriva de la Programación Lineal y representa un problema utilizando funciones matemáticas lineales y variables de decisión binarias que asumen el

valor 0 ó 1. Un modelo de Programación Binaria está conformado por una función objetivo y una serie de restricciones que limitan la solución; tanto la función objetivo como las restricciones del problema son funciones lineales de variables binarias.

Se han desarrollado varios algoritmos para encontrar la solución óptima de modelos de Programación Entera o cualquiera de sus variantes (Programación Entera Pura, Mixta o Binaria). Uno de los más utilizados es el algoritmo de ramificación y acotamiento, el cual se encuentra en muchos de los programas de computación para optimización disponibles en el mercado. El problema con estos algoritmos para Programación Entera es que a pesar de las capacidades computacionales de hoy en día, presentan serios inconvenientes cuando se trabaja con problemas muy grandes, con cientos de restricciones y variables (Hillier y Lieberman, 2001).

Para encontrar la solución óptima del modelo de aprovechamiento forestal planteado en este capítulo se utilizó el software de optimización SAS OR, específicamente el algoritmo de ramificación y acotamiento provisto en este programa (SAS, 2004).

Recocido Simulado

La técnica heurística de Recocido Simulado, en inglés *Simulated Annealing*, está basada en un algoritmo propuesto por Metropolis *et al.* (1953) en el marco de la termodinámica estadística, para simular el proceso de enfriamiento de un material (recocido). Kirkpatrick *et al.* (1983) e independientemente Cerny (1985) establecieron una analogía entre el proceso de recocido y el reto de resolver problemas de optimización combinatoria de gran escala. Desde entonces, el Recocido Simulado ha sido utilizado para resolver en forma exitosa una amplia variedad de problemas de optimización combinatoria.

El algoritmo de Recocido Simulado comprende una secuencia de iteraciones que modifica de forma aleatoria una solución de partida. El método comienza con una solución inicial, realiza una búsqueda local y genera una solución vecina de manera aleatoria, entendiéndose por solución vecina una solución que se encuentra cerca en el espacio de

soluciones y que se obtiene cambiando algún(os) atributo(s) de la solución actual. Si la solución vecina es mejor que la solución inicial, en términos de su valor objetivo, el algoritmo la acepta y se reinicia el proceso de búsqueda a partir de esta nueva solución; en caso contrario, cuando la solución vecina generada no es mejor que la solución inicial, el método puede aceptarla dependiendo de una función de probabilidad, la cual está dada por:

$$P(\Delta E) = e^{-(\Delta E/t)} \quad [2.5]$$

donde ΔE es la diferencia entre el valor objetivo de la solución actual y el valor objetivo de la solución vecina, y t es un parámetro del algoritmo llamado temperatura.

El algoritmo comienza siempre con una temperatura alta, por lo tanto en las primeras iteraciones $P(\Delta E)$ es cercana a 1, lo que significa que una nueva solución de peor calidad tiene una alta probabilidad de ser aceptada. La aceptación de una solución con un valor objetivo menos favorecedor permite salir de un posible mínimo local y explorar otras áreas del espacio de soluciones (Dowsland y Díaz, 2001). A medida que transcurren las iteraciones del algoritmo la temperatura va disminuyendo y con ella disminuye también la probabilidad de aceptar una solución peor. Para cada nivel de temperatura un número de nuevas soluciones n_{it} debe ser ensayado antes de que la temperatura sea reducida. Cuando este ciclo iterativo se completa, la temperatura se disminuye y comienza nuevamente el proceso de creación, evaluación y posible aceptación de soluciones vecinas. El proceso de búsqueda se repite hasta que el algoritmo ya no es capaz de generar soluciones de mejor calidad, cuando la temperatura se acerca a cero o cuando se ha alcanzado un número máximo de iteraciones. El diagrama de flujo correspondiente al algoritmo básico de Recocido Simulado se presenta en la Figura 2.2.

Para poder implementar el algoritmo de Recocido Simulado en la resolución de un problema de optimización es necesario definir el valor de los parámetros (temperatura inicial, número de iteraciones en cada nivel de temperatura, temperatura mínima), la tasa de disminución de la temperatura y el mecanismo para generar soluciones vecinas.

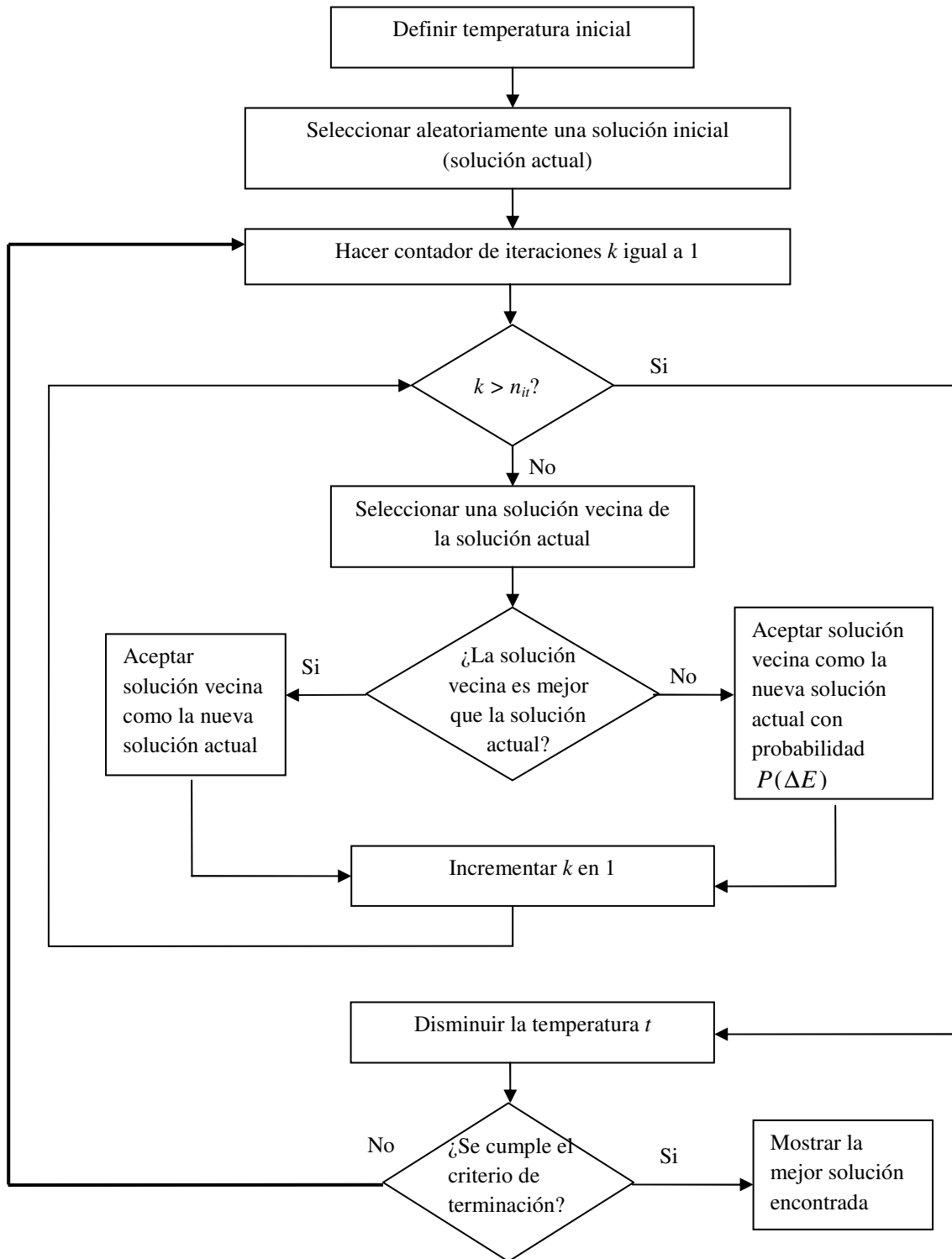


Figura 2.2. Diagrama de flujo básico de Recocido Simulado

Búsqueda Tabú

La Búsqueda Tabú o *Tabu Search* en inglés, es un método heurístico originalmente propuesto por Glover (1986) para resolver problemas de optimización combinatoria. Esta técnica al igual que el Recocido Simulado se fundamenta en la búsqueda de soluciones vecinas evitando óptimos locales, pero lo hace en forma determinística emulando los procesos de memoria del ser humano. Incorpora inteligencia al utilizar el concepto de “memoria” para conducir la búsqueda a nuevas zonas del espacio de soluciones e impedir búsquedas repetidas en áreas ya exploradas.

El paradigma básico de la Búsqueda Tabú es utilizar información acerca de la historia reciente del proceso de búsqueda para superar el problema de los óptimos locales. El método memoriza las soluciones que han sido examinadas recientemente, denominándolas puntos tabú (prohibidos) y evita que estos puntos sean nuevamente considerados al seleccionar una próxima solución.

Tal como ocurre en la técnica de Recocido Simulado, la búsqueda puede conducir a aceptar soluciones que deterioran el valor objetivo, esto ocurre cuando en una de las iteraciones del algoritmo no hay soluciones vecinas que sean mejores que las soluciones previamente encontradas o cuando estas soluciones son consideradas tabú. Aceptar soluciones peores ayuda a evitar ciclos y sirve además para diversificar la búsqueda de soluciones (Glover y Melián, 2003).

El algoritmo más sencillo de Búsqueda Tabú comienza con la selección de una solución de partida (**X**) y la inicialización de una estructura de memoria, llamada memoria de corto plazo o lista tabú, luego continúa un procedimiento iterativo de búsqueda de una mejor solución. En cada iteración se define un conjunto de soluciones vecinas de **X**, el cual excluye aquellas soluciones que se han visitado recientemente y que se encuentran almacenadas en la lista tabú. La Búsqueda Tabú mide la calidad de todas las soluciones vecinas que pertenecen al conjunto utilizando una función de evaluación relacionada a la función objetivo del problema, y selecciona la mejor de ellas para que sea la nueva

solución \mathbf{X} , aún cuando esta solución desmejore el valor objetivo en relación a otras soluciones encontradas en iteraciones previas. Al finalizar cada iteración, la solución \mathbf{X} se almacena en la memoria o lista tabú. El algoritmo culmina cuando se satisface un criterio de parada, el cual pudiera ser que se ha superado un número máximo de iteraciones, que la solución obtenida es cercana a la solución óptima esperada o ha pasado un cierto número de iteraciones sin que haya habido una mejora en la función objetivo (Hertz *et al.*, 1995). Al final el algoritmo debe mostrar la mejor solución encontrada durante todo el proceso. En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de flujo básico de Búsqueda Tabú.

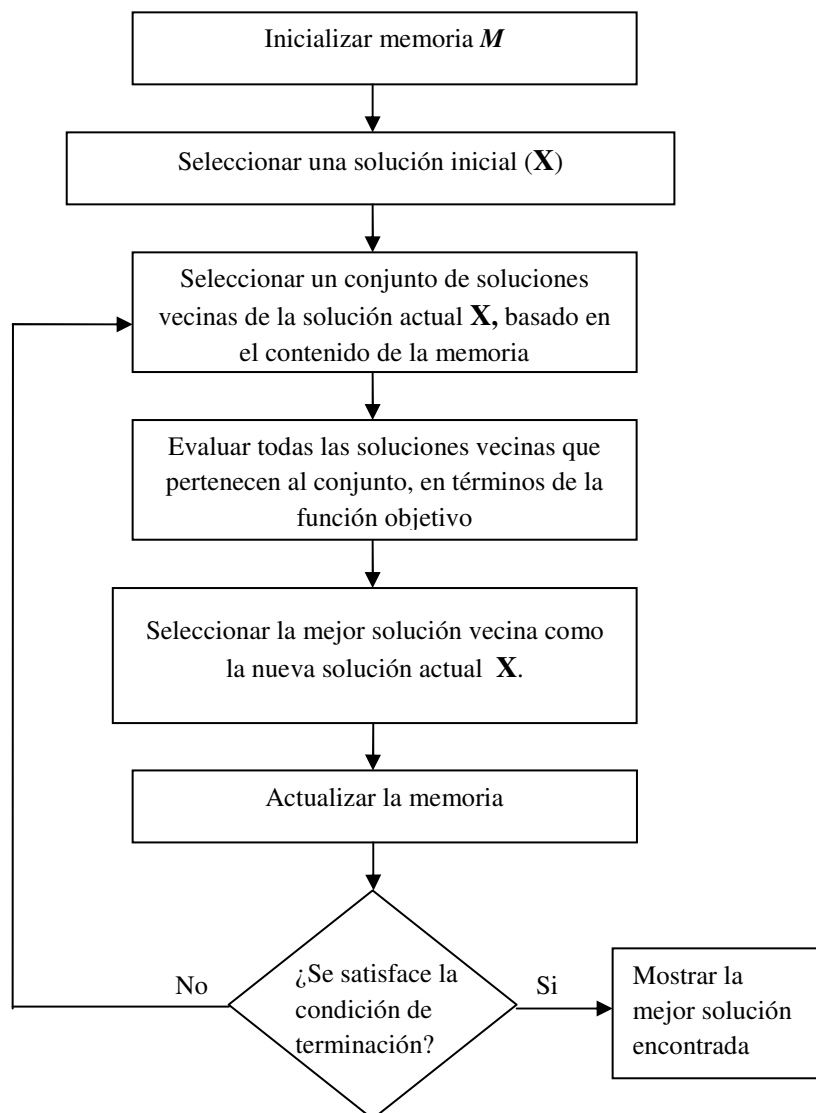


Figura 2.3. Diagrama de flujo básico de Búsqueda Tabú

Versiones mejoradas de la Búsqueda Tabú incluyen una estructura de memoria de largo plazo, estrategias de intensificación de la búsqueda en un área promisoría del espacio de soluciones y diversificación hacia otras zonas no exploradas.

Algoritmos Genéticos

El término Algoritmo Genético, en inglés *Genetic Algorithm*, fue usado por primera vez por John Holland (1975), al desarrollar una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin y en la genética.

Los principios de la naturaleza en los cuales están inspirados los Algoritmos Genéticos son muy simples. De acuerdo con la teoría de Charles Darwin, el principio de selección privilegia a los individuos más aptos con mayor longevidad y, por lo tanto, con mayor probabilidad de reproducción. Por el contrario, individuos pocos dotados producirán un menor número de descendientes. Los individuos con más descendientes tienen más oportunidades de transmitir sus códigos genéticos a las próximas generaciones. Tales códigos genéticos constituyen la identidad de cada individuo y están representados en los cromosomas. La combinación de buenas características provenientes de diferentes ancestros, puede producir descendientes cuya adaptación es mucho mayor que la de cualquiera de sus ancestros. De esta manera, las especies evolucionan logrando características que les permiten adaptarse cada vez mejor al entorno en el que viven.

Los Algoritmos Genéticos usan una analogía directa con el comportamiento natural. Evalúan simultáneamente un conjunto de soluciones del problema al que se le denomina población. Una solución corresponde a un individuo. Para representar una solución del problema se utilizan los conceptos de cromosoma, gen y alelos.

Cromosoma: es una estructura de datos que representa una de las posibles soluciones del espacio de búsqueda del problema.

Gen: corresponde a cada uno de los elementos que conforman un cromosoma.

Alelos: son los valores que pueden tomar los genes de un cromosoma.

Una solución o individuo se representa mediante una cadena de caracteres, siendo la representación binaria la más común. La Figura 2.4 ilustra algunos de los conceptos más importantes de los Algoritmos Genéticos.

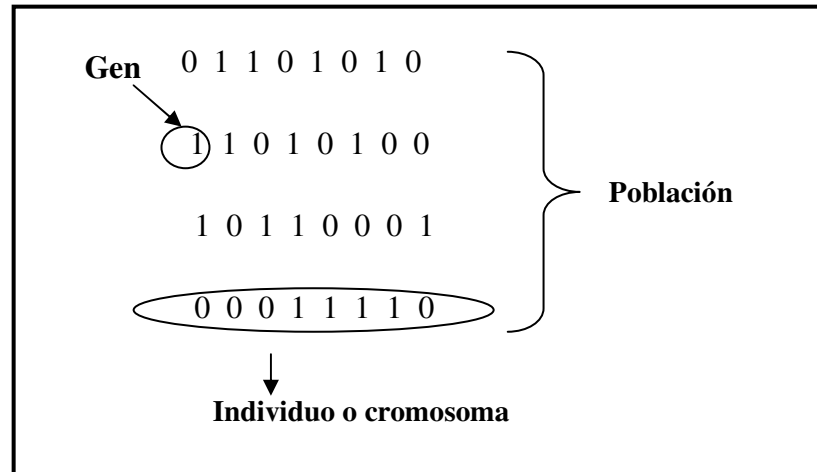


Figura 2.4. Conceptos básicos de los Algoritmos Genéticos

Las soluciones o individuos se evalúan de acuerdo a una función de adaptación, llamada *fitness*, que mide su calidad y les asocia un valor único que corresponde a un número real no negativo, que es más grande cuanto mejor sea la solución; en la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos, poder sobrevivir y reproducirse. La función de adaptación está relacionada con la función objetivo que se desea optimizar, si el problema es de maximización, la adaptación debe indicar qué tan alto es el valor de la función objetivo para un individuo particular. Cuando se trata de un problema de minimización, la adaptación para un individuo debe ser tanto más alta cuanto más pequeño sea su valor objetivo. En algunos casos pueden coincidir la función objetivo y la función de adaptación, pero esto no es lo más común, en la mayoría de los problemas es necesario establecer una equivalencia entre la función de adaptación y la función objetivo. La función de adaptación se debe construir cuidadosamente, ya que su calidad puede influir de manera considerable en la eficiencia de un Algoritmo Genético (Dréo *et al.*, 2006).

El procedimiento que utilizan los Algoritmos Genéticos para resolver un problema de optimización es evaluar una población de soluciones, y a partir ésta crear una nueva población utilizando operadores genéticos diseñados para tal fin. La nueva población reemplaza a la anterior y verifica la interesante propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas soluciones en comparación con la población anterior (Cabezas, 2002). Este proceso se repite un determinado número de iteraciones (generaciones), después de varios ciclos de evolución la población deberá contener individuos más aptos y al final, si el Algoritmo Genético ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

Un concepto fundamental en el contexto de los Algoritmos Genéticos es el de operadores genéticos. Los operadores genéticos son los mecanismos que garantizan la evolución de los individuos, creando a partir de una población inicial nuevas poblaciones o generaciones de individuos mejorados. Los tres operadores básicos que operan en los Algoritmos Genéticos son selección, mutación y cruzamiento.

El operador de **selección** elige individuos en una población para su reproducción o supervivencia en el Algoritmo Genético, su objetivo es resaltar las mejores soluciones dentro de una población. Este operador no genera soluciones nuevas en el espacio de búsqueda, sino que determina qué individuos dejarán descendencia y en qué cantidad en la próxima generación (Deb, 2000). La idea básica es que las soluciones que tienen mayor adaptación tienen mayor probabilidad de selección. Así, la selección permite orientar la búsqueda hacia aquellos puntos más promisorios, es decir, con la mayor adaptación observada hasta el momento. Hay diferentes maneras de implementar el operador de selección, cada una de las cuales define en forma diferente una distribución de probabilidad basada en la adaptación.

El **cruzamiento** es una de las operaciones fundamentales que intervienen en todo Algoritmo Genético. Se aplica a dos individuos (padres) y consiste en una combinación de los mismos para obtener como resultado otros dos nuevos individuos (hijos). En el cruzamiento se reemplazan algunos genes de un padre por los genes correspondientes

del otro padre. El cruzamiento puede implementarse de varias formas, una manera sencilla es definir un punto de cruzamiento e intercambiar los genes de los padres siguientes a esta posición para dar origen a un hijo, luego intercambiar los genes anteriores (incluyendo el punto de cruzamiento) para crear otro hijo. Por ejemplo, supóngase que se tienen dos individuos 10011100 y **00010111**, los cuales se cruzan utilizando como punto de cruzamiento el gen 4, los hijos resultantes son 100**10111** y **0001**1100. En otras palabras, durante el cruzamiento se combinan dos soluciones del problema para dar origen a dos nuevas soluciones.

El tercer operador genético básico es la **mutación**, que consiste en cambiar alguna(s) de las características de un individuo para crear un nuevo individuo. La mutación escoge aleatoriamente un subconjunto de genes de un individuo y cambia su valor, el tamaño del subconjunto de genes puede ser un número predeterminado. Cuando se cambia sólo un gen se le denomina al proceso mutación simple, por ejemplo, si se tiene el individuo 10011100 y se muta el gen 2, el individuo resultante sería 1**1**011100. Otra manera de implementar la mutación es examinar cada gen de un individuo y de acuerdo a una cierta probabilidad (usualmente muy pequeña) cambiar su valor, en este caso no se sabe de antemano cuántos genes serán cambiados en la mutación (Reeves, 1996). La mutación permite generar nuevas soluciones que exploren regiones del dominio del problema que probablemente no se han visitado aún, favoreciendo la diversidad en la población de soluciones.

En su trabajo, Holland (1975) propone una manera de seleccionar individuos y cruzarlos. Actualmente existen otras propuestas, pero las de Holland constituyen la base de muchos desarrollos teóricos y prácticos en el área. Goldberg (1989) retomó el algoritmo de Holland y lo popularizó llamándolo *Algoritmo Genético Simple* (AGS).

En el Algoritmo Genético Simple se utiliza una representación binaria y se aplican los tres operadores genéticos básicos selección, cruzamiento y mutación. Los pasos que sigue el AGS se describen a continuación.

1. Comenzar con una población generada en forma aleatoria y compuesta por N cromosomas (soluciones candidatas al problema). A esta se le llamará población actual.
2. Evaluar cada solución de la población actual usando la función de adaptación.
3. Repetir los siguientes pasos hasta crear una descendencia de N individuos
 - Seleccionar un par de individuos (soluciones) padres de la población actual, de acuerdo a una probabilidad de selección que depende de la adaptación.
 - Con probabilidad P_c (probabilidad de cruzamiento), cruzar el par de individuos para dar origen a dos nuevos individuos. Si el cruzamiento no se lleva a cabo generar dos nuevos individuos que serán copias exactas de sus padres.
 - Mutar los dos nuevos individuos en cada gen con probabilidad P_m y colocar las dos soluciones resultantes en la nueva población.
 - Si N es impar un individuo de la nueva población puede ser descartado aleatoriamente.
4. Reemplazar la población actual con la nueva población.
5. Repetir desde el paso 2 hasta el 4 un número determinado de iteraciones o hasta que se cumpla un condición de terminación.

Cada iteración de este proceso es llamada generación. Un Algoritmo Genético es típicamente iterado entre 50 y 500 generaciones o más. Al final de cada corrida hay uno o más cromosomas con una alta adaptación, aquel que tenga la mayor adaptación se considera la solución del problema. En la Figura 2.5 se presenta un diagrama de flujo con los pasos de un Algoritmo Genético Simple, este procedimiento es la base para diversas aplicaciones de Algoritmos Genéticos, hay también versiones mucho más complicadas que utilizan formas diferentes de los operadores genéticos básicos de selección, cruzamiento y mutación, incluso pueden incluir otros operadores.

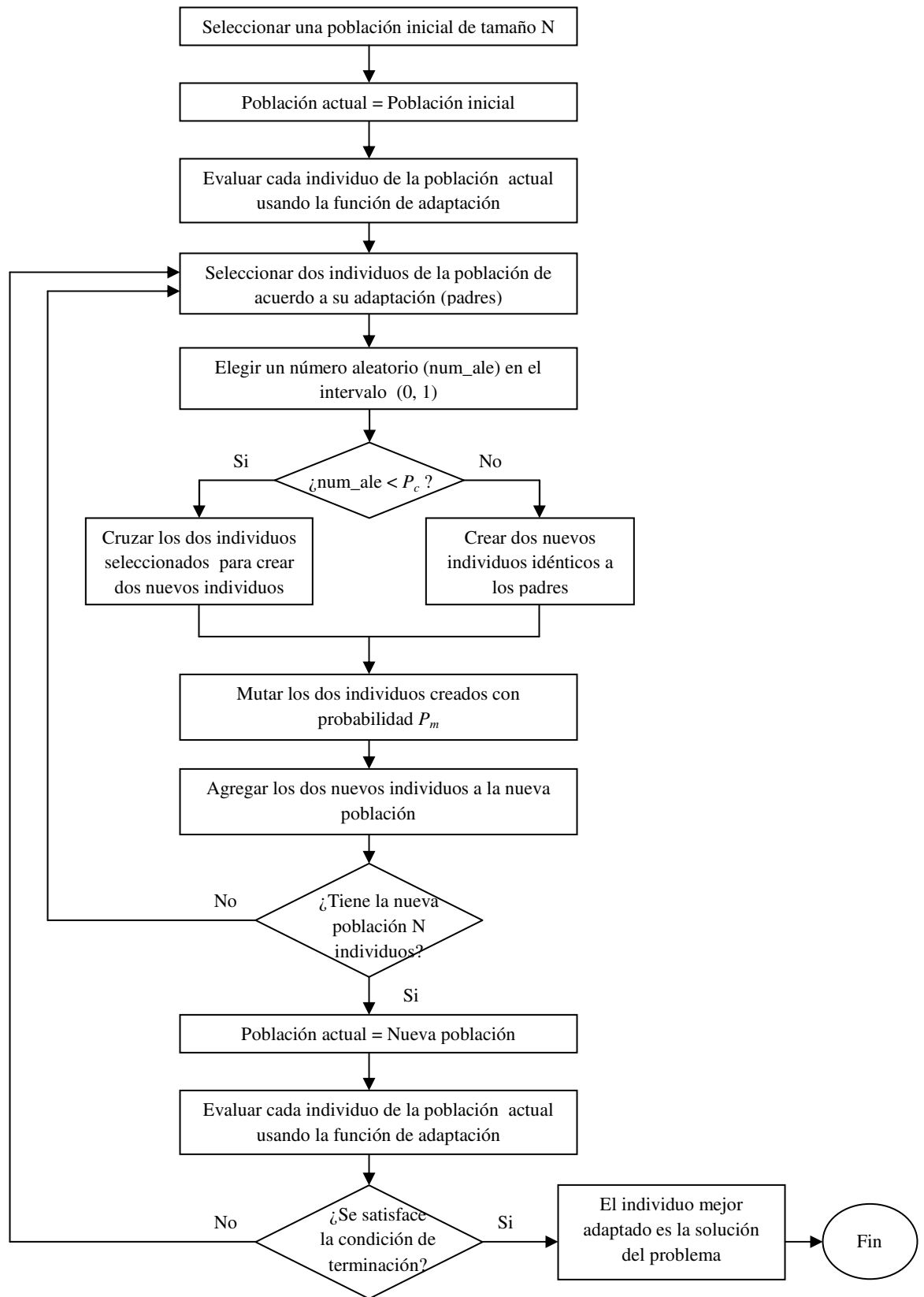


Figura 2.5. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético Simple

2.2.4 Implementación de los algoritmos heurísticos

Se diseñaron tres algoritmos, cada uno enfocado en resolver el problema de planificación del aprovechamiento forestal utilizando una de las heurísticas en estudio. La implementación se realizó en Visual Basic 6.0 y las pruebas se llevaron a cabo en un computador con procesador modelo Intel(R) Core (TM) 2 Quad de 2.4 GHz, 3 GB de memoria RAM de y disco duro de 465 GB. En el desarrollo de los algoritmos heurísticos se utilizaron las siguientes estrategias de diseño:

Representación de la solución

Se hizo mediante un vector de variables binarias de tamaño igual al número de rodales multiplicado por período de planificación (20 x 7 = 140). En cada elemento del vector se almacena una variable binaria X_{ij} que indica si el rodal i se corta o no en el año j . En la Figura 2.6 se muestra una representación gráfica; puede notarse que cada rodal tiene asociados siete elementos del vector correspondientes a los siete años del período de planificación, uno de estos elementos tiene asignado el valor 1 para indicar que en ese año se corta ese rodal, los demás tienen asignado el valor 0. Esta representación vectorial se usó en los tres algoritmos heurísticos.

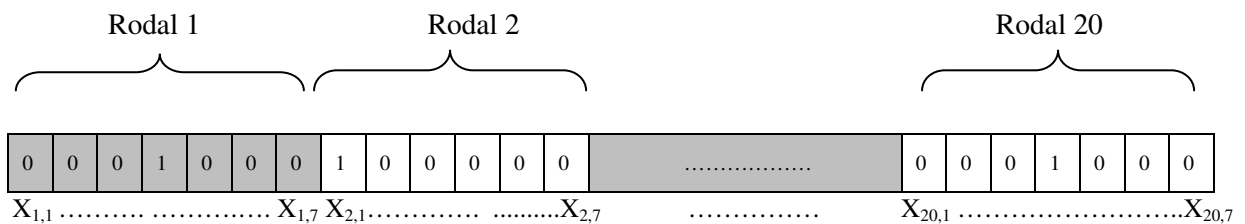


Figura 2.6. Representación de una solución del problema

Criterio de parada

Para poder realizar comparaciones entre los métodos heurísticos, los tres algoritmos utilizaron el mismo criterio de finalización, el cual fue un número máximo de iteraciones.

Solución inicial

En los algoritmos de Recocido Simulado y Búsqueda Tabú la solución inicial se generó de manera aleatoria: para cada rodal se determina si éste será aprovechado, lo cual ocurre con una probabilidad igual a 0,95. Si un rodal es aprovechado se elige al azar el año en que se cortará (todos los años en que se puede cortar un rodal tienen igual probabilidad) y se le asigna a la variable binaria correspondiente el valor 1 y a las demás variables relacionadas a ese rodal se le asigna 0. Si un rodal no es aprovechado todas sus variables son iguales a 0. En el caso de Algoritmos Genéticos, es necesario crear una población inicial de N individuos, para ello cada individuo (solución) de la población es generado de forma aleatoria de acuerdo al procedimiento anterior.

Generación y evaluación de soluciones vecinas

La forma de generar soluciones vecinas y medir su calidad se hizo de la misma manera en los algoritmos de Recocido Simulado y Búsqueda Tabú, considerando que una solución vecina de una solución \mathbf{X} será igual a \mathbf{X} excepto por la asignación del año de corta de un rodal. El procedimiento para crear una solución vecina es elegir aleatoriamente un rodal i y un año j , si la variable X_{ij} de la solución \mathbf{X} vale 1 su valor se cambia a 0 en la solución vecina (no se aprovecha el rodal), si X_{ij} es igual a 0 se le asigna 1 en la solución vecina y a todas las demás variables relacionadas al rodal i se les da el valor 0.

En cuanto a la manera de medir la calidad de una solución en los algoritmos Recocido Simulado y Búsqueda Tabú, se utilizó una función de evaluación que incluye la función objetivo original (ecuación [2.1]) y una penalización por la violación total medida en toneladas (t) de las restricciones de demanda. De esta manera, las soluciones que violan las restricciones son penalizadas y tienen un peor valor de la función de evaluación que aquellas soluciones que satisfacen las restricciones. La función de evaluación está dada por la siguiente ecuación:

$$fE(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) + P \times VT(\mathbf{X}) \quad [2.6]$$

donde $f(\mathbf{X})$ es la función objetivo del problema original, P corresponde a la penalización (unidades monetarias/t) que se impone a la violación de las restricciones de demanda, y $VT(\mathbf{X})$ es la violación total (t) de las restricciones de demanda para una solución \mathbf{X} , la cual se calcula según la ecuación [2.7].

$$VT(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^7 (20000 - g_k) \times I_k \quad [2.7]$$

siendo g_k el valor de la restricción de demanda para el año k evaluada en \mathbf{X} , o lo que es igual, el volumen aprovechado en el año k si se aplica el plan de cortas (solución) \mathbf{X} . I_k es una variable indicadora que vale 1 si en el año k se viola la restricción de demanda y en otro caso vale 0.

Curva de enfriamiento y parámetros del algoritmo de Recocido Simulado

Se utilizó la forma exponencial o geométrica para la curva que determina la velocidad de disminución de la temperatura a medida que avanzan las iteraciones del algoritmo, la ecuación es la siguiente:

$$t_{z+1} = \alpha t_z \quad [2.8]$$

donde t_{z+1} es la temperatura en la iteración $z+1$, t_z es la temperatura en la iteración z y α es una constante cercana a 1, escogida por lo general en el rango de 0,9 a 0,99 (Dréo *et al.*, 2006).

Los parámetros necesarios para ejecutar el algoritmo de Recocido Simulado son temperatura inicial (t_0), tasa de disminución de la temperatura (α) y número de iteraciones en cada nivel de temperatura (n_{it}), todos fueron definidos mediante experimentación.

Estrategias utilizadas en el algoritmo de Búsqueda Tabú

Hay varios aspectos que deben definirse para implementar un algoritmo de Búsqueda Tabú, tales como la permanencia tabú (número de iteraciones que una solución

permanece en condición de tabú), la estructura de la memoria de corto plazo y los criterios de aspiración que son condiciones que permiten obviar el estatus de tabú para algunas soluciones.

En este trabajo se consideró un valor fijo para la permanencia tabú, el cual fue definido mediante experimentación. En cuanto a la estructura de la memoria de corto plazo o lista tabú corresponde a un vector de tamaño igual al número de rodales (20), el valor guardado en la posición i del vector es el número de iteraciones durante las cuales no puede modificarse el año de cosecha del rodal i , por ser un movimiento tabú. Se utilizó como criterio de aspiración permitir una solución tabú si su valor objetivo es mejor que el de todas las soluciones hasta ese momento encontradas.

Función de adaptación, operadores y parámetros del Algoritmo Genético.

La función utilizada en el Algoritmo Genético para medir el grado de adaptación de un individuo fue la siguiente:

$$FIT(\mathbf{X}) = cota - fE(\mathbf{X}) \quad [2.9]$$

donde $FIT(\mathbf{X})$ es la función de adaptación o *fitness*, $fE(\mathbf{X})$ es una función derivada de la función objetivo original del problema (ecuación [2.6]), y la cota es una cantidad igual o mayor que el máximo valor que puede tomar $fE(\mathbf{X})$.

Los operadores genéticos que se incluyen en el algoritmo para crear una nueva población a partir de una existente son selección, cruzamiento y mutación.

- Selección: se realizó una selección proporcional a la adaptación y se utilizó el método de la ruleta. La selección proporcional fue propuesta por Holland (1975) y se fundamenta en la idea de que la probabilidad de selección P_i del i -ésimo individuo en la población depende de la adaptación relativa de éste con respecto a la población:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^M f_j} \quad [2.10]$$

donde M es la cantidad de individuos de la población y f_j es la adaptación del j -ésimo individuo.

Esta definición implica que la función de adaptación es positiva en el dominio de búsqueda y debe ser maximizada (a mayor valor de la función de adaptación, mayor es la probabilidad de selección).

El método de la ruleta es el esquema básico para implementar la selección proporcional. Los pasos para aplicar este método son:

1. Relacionar uno a uno los individuos con segmentos contiguos de la recta real $[0,1)$, tal que cada segmento individual sea proporcional a la probabilidad de adaptación.
 2. Generar un número aleatorio en $[0,1)$.
 3. Seleccionar el individuo cuyo segmento cubre el número aleatorio.
 4. Repetir el proceso hasta obtener el número deseado de individuos.
- Cruzamiento: se utilizó cruzamiento de un punto con una probabilidad P_c . Para preservar la estructura original de una solución y garantizar que de los siete elementos del vector que corresponden a un rodal como máximo uno de ellos tenga el valor 1 (para cumplir las restricciones de singularidad), los puntos de cruzamiento que pueden utilizarse están limitados a aquellas posiciones del vector donde finaliza un rodal (7, 14, 21,..., 133), entre estos valores se selecciona aleatoriamente el punto de cruzamiento.
 - Mutación: se aplicó mutación simple con una probabilidad P_m . La mutación se llevó a cabo seleccionando aleatoriamente un rodal i y un año j y si el valor de X_{ij} es igual a 0 se le asigna 1 y a todas las demás variables relacionadas al rodal i se les asigna 0, en caso contrario, si X_{ij} vale 1 se cambia su valor a 0.

Los parámetros necesarios para correr el algoritmo genético son tamaño de la población (N), probabilidad de cruzamiento (P_c) y probabilidad de mutación (P_m), éstos fueron definidos mediante experimentación.

Criterios de evaluación de los algoritmos heurísticos

El desempeño de los algoritmos heurísticos fue evaluado en función del valor objetivo obtenido, el error relativo con respecto a la solución óptima encontrada mediante Programación Entera Binaria, la iteración en la que consigue la solución y el tiempo de computación necesario para ejecutar los algoritmos. Para ello se realizaron 100 corridas de cada algoritmo y en cada una de ellas se registró el valor de estas variables, posteriormente se calcularon sus estadísticas básicas (media, desviación estándar, valor mínimo y máximo). El número de iteraciones realizadas en una corrida de un algoritmo fue igual a 500 para las tres técnicas heurísticas. El error relativo de una solución fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Error relativo} = \frac{V_{obh} - V_{opt}}{V_{opt}} \times 100\% \quad [2.11]$$

donde V_{opt} es el valor objetivo óptimo obtenido mediante Programación Entera Binaria y V_{obh} es el valor objetivo obtenido en una corrida de un algoritmo heurístico.

La metodología que fue utilizada para evaluar el comportamiento de las técnicas heurísticas Recocido Simulado, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos se ajusta a las técnicas de validación propuestas por Bettinger *et al.* (2009). Estos autores definen seis niveles de validación para las técnicas heurísticas en problemas de planificación forestal, comenzando con la ausencia de validación (nivel 1) y finalizando con la comparación de las soluciones heurísticas con la solución óptima obtenida mediante un método de programación matemática (nivel 6). Igualmente indican que dependiendo de las heurísticas utilizadas y de los problemas a ser solucionados pueden ser apropiados uno o más de estos niveles. En este trabajo se utiliza validación en el nivel 2 y en el nivel 6. El nivel 2 concierne al uso de estadísticas básicas para valorar la calidad de las soluciones generadas por las heurísticas, para lo cual se requiere de un conjunto de soluciones independientes, este supuesto de independencia se satisface en las heurísticas estocásticas como Recocido Simulado y Algoritmos Genéticos, y en técnicas determinísticas como Búsqueda Tabú se puede cumplir si se generan soluciones iniciales

aleatorias, tal como se hizo en este caso. El nivel 6 es el de mayor orden ya que implica la comparación de dos técnicas, una heurística y una técnica exacta, para resolver el mismo problema, en esta investigación al calcular el error relativo de las soluciones heurísticas respecto a la solución óptima obtenida mediante programación entera se realizó validación de nivel 6.

2.3 Resultados y Discusión

En la Tabla 2.2 se presenta la solución óptima que fue obtenida utilizando Programación Entera Binaria, se especifica la secuencia de corta que tiene el costo total de aprovechamiento mínimo, siendo éste igual a 7832018,3 unidades monetarias.

Los valores de los parámetros de los algoritmos heurísticos que fueron obtenidos mediante experimentación y que posteriormente fueron usados en las 100 corridas que se realizaron de cada algoritmo se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2. Solución óptima obtenida mediante Programación Entera Binaria

Año	Rodales a cortar	Volumen aprovechado (t)
1	4 y 19	101492
2	1 y 20	90873
3	8 y 18	91378
4	9, 13 y 15	90315
5	5, 10 y 14	90515
6	2, 6, 17	91197
7	3, 11 y 12	90057
Volumen total (t)		645827
Costo total de aprovechamiento (unidades monetarias)		7832018,3
Tiempo de ejecución (s)		3563

t: toneladas, s: segundos

Tabla 2.3. Parámetros de los algoritmos heurísticos

Recocido Simulado	Búsqueda Tabú	Algoritmos Genéticos
Temperatura inicial: 5×10^{11}	Permanencia tabú: 15	Tamaño de la población (N): 1000
Iteraciones del algoritmo: 500	Iteraciones del algoritmo: 500	Iteraciones del algoritmo: 500
Iteraciones en cada nivel de temperatura (n_{it}): 300		Probabilidad de cruzamiento (P_c): 1
Tasa de disminución de la temperatura (α): 0,9		Probabilidad de mutación (P_m): 0,05

La técnica Recocido Simulado registró un valor objetivo promedio menor que las demás técnicas heurísticas, siendo éste un 3,4% más bajo que el obtenido por el Algoritmo Genético y 7,5% menor que el valor objetivo promedio de la Búsqueda Tabú (Tabla 2.4 y Figura 2.7). Esta última técnica, fue la que mostró mayor variabilidad en el valor objetivo y el Algoritmo Genético fue la de menor variabilidad.

En cuanto al error relativo, debido a su forma de cálculo sigue el mismo patrón del valor objetivo, esto es, su valor medio es menor en Recocido Simulado, seguido por Algoritmos Genéticos y Búsqueda Tabú. A partir del error relativo medio se puede calcular la eficacia de los métodos heurísticos para encontrar la solución del problema, haciendo la resta entre el 100% y el valor del error relativo promedio, de esta manera el Recocido Simulado tiene una eficacia del 94,7%, el Algoritmo Genético una eficacia igual al 91,0% y la Búsqueda Tabú una eficacia del 86,2%. Estos valores indican que los métodos heurísticos utilizados fueron efectivos al encontrar soluciones próximas a la óptima, destacándose Recocido Simulado y Algoritmos Genéticos con una eficacia superior al 90% (Figura 2.8).

Tabla 2.4. Estadísticas básicas de las variables de desempeño evaluadas

	RS	BT	AG
Valor Objetivo (unidades monetarias)			
\bar{X}	8246495,3	8911026,4	8536323,5
DE	408056,7	900412,0	184519,6
Min	7849573,9	8238053,5	8315115,4
Max	10071125,3	12073707,9	8921306,0
Error relativo (%)			
\bar{X}	5,29	13,77	8,99
DE	5,21	11,50	2,36
Min	0,22	5,18	6,16
Max	28,59	54,16	13,91
Iteración en la que se encuentra la mejor solución			
\bar{X}	125	24	224
DE	8	66	95
Min	105	3	44
Max	139	496	462
Tiempo de ejecución (s)			
\bar{X}	24,26	1,34	141,32
DE	0,45	0,02	1,23
Min	23,68	1,32	139,38
Max	25,55	1,42	145,37

\bar{X} : media, DE: desviación estándar, Min: valor mínimo, Max: valor máximo, s: segundos, RS: Recocido Simulado, BT: Búsqueda Tabú, AG: Algoritmos Genéticos.

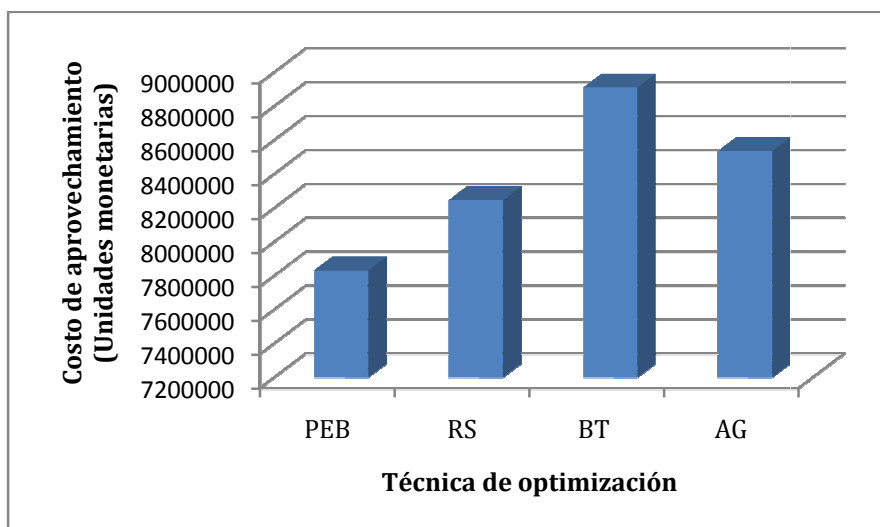


Figura 2.7. Valor objetivo (costo total de aprovechamiento) obtenido mediante Programación Entera Binaria y las técnicas heurísticas

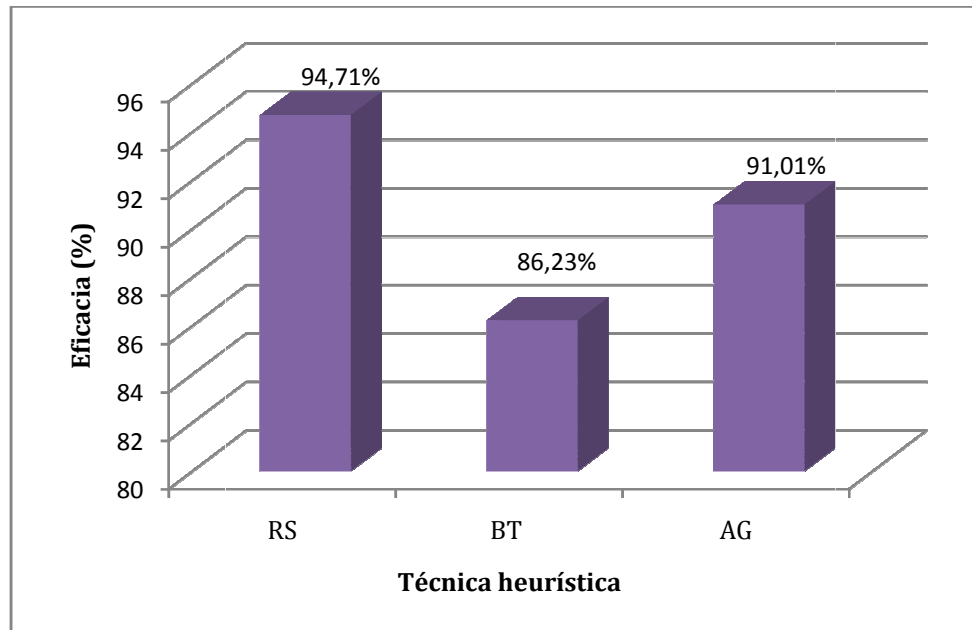


Figura 2.8. Eficacia de las técnicas heurísticas

La mejor solución fue encontrada con Recocido Simulado, esta solución tiene un error relativo del 0,22%, lo que significa que está muy cerca de la óptima. En la Tabla 2.5 se presentan las secuencias de corta que corresponden a las mejores soluciones encontradas por cada uno de los métodos heurísticos, en los tres casos estas soluciones tienen un error relativo inferior al 7%, por lo que puede decirse que son buenas soluciones del problema. Vale la pena destacar que estas secuencias de corta son bastante distintas a la secuencia óptima de corta encontrada mediante programación matemática (Tabla 2.2), los rodales que se aprovechan en cada año varían de una técnica a otra, en pocos casos hay coincidencias.

Tabla 2.5. Mejor solución obtenida por los algoritmos heurísticos

Año	RS		BT		AG	
	Rodales a cortar	Volumen aprovechado (t)	Rodales a cortar	Volumen aprovechado (t)	Rodales a cortar	Volumen aprovechado (t)
1	4, 19	101492	5, 13, 18	98536	2, 5, 19	92309
2	14, 18	90681	1, 2, 4	95533	1, 18	90873
3	8, 20	91378	8, 19	93580	8, 13, 15	91812
4	5, 10, 15	90303	2, 14, 20	118665	14, 20	104220
5	1, 6, 13	90908	3, 9, 10, 11	90996	4, 10, 12, 16	100980
6	2, 3, 9	90144	12, 15, 16	90788	3, 6, 7	91656
7	11, 12, 17	90998	6, 7, 17	99927	9, 11, 17	95966
Volumen total (t)		645905	688025		667815	
Costo total de aprovechamiento (u.m.)		7849573,9	8238053,5		8315115,4	
Error relativo (%)		0,22	5,18		6,16	

RS: Recocido Simulado, BT: Búsqueda Tabú, AG: Algoritmos Genéticos, t: toneladas, u.m: unidades monetarias.

El tiempo necesario para ejecutar 500 iteraciones de los algoritmos heurísticos fue medido en todas las corridas, la técnica más rápida fue Búsqueda Tabú con un tiempo promedio de 1,2 s (Figura 2.9). El Recocido Simulado tuvo un tiempo promedio de 24,3 s (aproximadamente 20 veces mayor que Búsqueda Tabú) y el Algoritmo Genético registró un tiempo de ejecución promedio igual a 141,3 segundos (aproximadamente 118 veces mayor que Búsqueda Tabú y 6 veces mayor que RS). En los Algoritmos Genéticos el tiempo de computación depende en gran parte del tamaño de la población, en este estudio se utilizó una población de 1000 individuos por lo que en cada corrida el algoritmo debe evaluar 1000 soluciones, es por esta razón que el tiempo de ejecución se incrementa considerablemente en relación a las otras técnicas heurísticas.

El tiempo de computación que requirió el programa SAS OR para obtener la solución óptima mediante Programación Entera Binaria fue de casi una hora (3563 s), aproximadamente 25 veces mayor que el tiempo de cómputo promedio del algoritmo heurístico más lento. Estos resultados corroboran una de las ventajas que se le atribuyen a los métodos heurísticos, pueden encontrar una solución a un problema en forma mucho

más rápida que los métodos de programación matemática clásicos. Aunque en este problema particular el tiempo de ejecución del algoritmo de Programación Entera es aceptable, en problemas de mayor envergadura el tiempo de computación necesario para conseguir la solución óptima puede incrementarse considerablemente. En situaciones reales es muy importante poder obtener soluciones en un tiempo oportuno para poder tomar decisiones de planificación; en problemas complejos los métodos de programación matemática presentan limitaciones al respecto, incluso en muchos casos son incapaces de obtener una solución en un tiempo razonable.

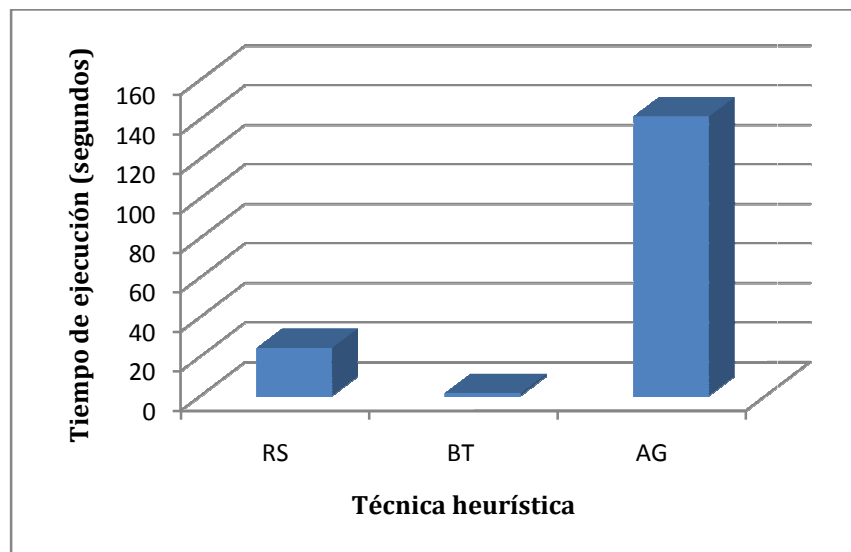


Figura 2.9. Tiempo de ejecución de los algoritmos heurísticos

En las diferentes corridas también se registró la iteración en la que un algoritmo obtiene la solución (Tabla 2.4), después de esta iteración el proceso de búsqueda no mejora el valor objetivo de las soluciones encontradas. Se observó que la Búsqueda Tabú, en promedio, encontró la solución en la iteración 24 y el algoritmo genético en la iteración 224, los valores de la desviación estándar, máximo y mínimo muestran una alta variabilidad en estos resultados. El Recocido Simulado en promedio no mejoró la solución

después de la iteración 125, sin embargo, en esta técnica la variabilidad es mucho menor. La observación de esta variable permite determinar un número de iteraciones máximo más adecuado para los algoritmos, en este caso podría disminuirse el valor de este parámetro para Recocido Simulado y Búsqueda Tabú, lo cual acortaría el tiempo de ejecución. Otra alternativa para reducir el tiempo de cómputo puede ser la utilización de un criterio de parada diferente, tal como finalizar el algoritmo después que hayan ocurrido cierto número de iteraciones sin conseguir una mejora. No obstante, es importante recordar que en este trabajo se fijó un número de iteraciones igual para todos los algoritmos con la finalidad de realizar comparaciones entre ellos.

Considerando los resultados anteriormente expuestos puede decirse que Recocido Simulado fue la técnica heurística más eficiente al resolver el problema de aprovechamiento forestal planteado, ya que obtuvo un valor objetivo promedio menor, fue capaz de conseguir la solución más cercana a la óptima y aunque no tuvo el tiempo de computación más bajo, éste fue bastante razonable y mucho menor que el tiempo requerido por el método de Programación Entera Binaria. Los Algoritmos Genéticos también tuvieron un buen desempeño al resolver el problema, por lo cual se considera una buena alternativa de solución en este caso particular. La Búsqueda Tabú es la heurística que requirió un tiempo de cómputo menor pero fue la menos eficaz en encontrar una solución, en tal sentido cabe señalar que se utilizó la versión básica de esta técnica, el desempeño del algoritmo podría mejorarse incluyendo estrategias avanzadas de diseño como diversificación, intensificación y memoria a largo plazo. También pudieran probarse otros mecanismos para obtener soluciones vecinas.

Es difícil comparar los resultados de este estudio con los reportados en otras investigaciones, tal como lo señalan Pukkala y Kurttila (2005), un problema para realizar comparaciones es que el desempeño de los métodos heurísticos depende del tipo de problema, de las estrategias de diseño utilizadas en los algoritmos y de los valores de los parámetros usados, razón por la cual las conclusiones pueden variar considerablemente de un caso a otro. Sin embargo, es posible señalar que el comportamiento de las

heurísticas utilizadas en este capítulo concuerda con el trabajo de Bettinger *et al.* (2002) quienes categorizaron un conjunto de heurísticas en tres clases: muy buenas, adecuadas y menos que adecuadas. De acuerdo al valor de la función objetivo que son capaces de obtener, estos autores sitúan la técnica de Recocido Simulado en el primer grupo, Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos en el segundo. En relación al tiempo de computación, los resultados acá obtenidos se ajustan a la clasificación propuesta por Pukkala y Kurttila (2005), en la que la Búsqueda Tabú se encuentra entre las técnicas de mediana rapidez y tanto Recocido Simulado como Algoritmos Genéticos pertenecen al grupo de las heurísticas más lentas, otro tipo de heurísticas más rápidas pero menos eficaces en encontrar valores objetivo cercanos al óptimo y que se encuentran en la clasificación de estos autores, tales como el ascenso aleatorio y la técnica Hero no fueron probadas en este estudio.

Además de la posibilidad de encontrar soluciones cercanas al óptimo en un tiempo de computación menor al requerido por una técnica de programación matemática, otra ventaja de los métodos heurísticos es su capacidad para brindar diferentes soluciones de un problema. Por su parte, los métodos de programación matemática sólo pueden encontrar una única solución, que aunque es la óptima pudiera tener en algunos casos dificultades para ser llevada a la práctica. Es más útil para el planificador forestal tener varias alternativas de solución y de esta forma elegir aquella que además de tener un buen valor de la función que se está optimizando, tenga mayor factibilidad de implementación.

2.4 Conclusiones

Los métodos heurísticos representan una excelente alternativa en la resolución de problemas de planificación forestal, puesto que permiten manejar la complejidad implícita en este tipo de problemas y solventar las limitaciones que tienen los métodos de programación matemática en muchas situaciones reales. Las heurísticas utilizadas en

este trabajo mostraron su efectividad para resolver el problema de planificación del aprovechamiento forestal planteado, se destacaron la técnica de Recocido Simulado y los Algoritmos Genéticos con una eficacia superior al 90%, mientras que la Búsqueda Tabú presentó una eficacia del 86,2%. El tiempo de computación promedio de los algoritmos heurísticos desarrollados fue menor en todos los casos que el tiempo de ejecución requerido por el método de Programación Entera Binaria, este es un factor clave que debe considerarse a la hora de elegir un método de solución para un problema de planificación forestal. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que las heurísticas presentan una serie de ventajas que pueden ser aprovechadas para resolver problemas de planificación forestal de manera satisfactoria, tanto en tiempo de cómputo como en la calidad de las soluciones obtenidas.

A pesar de las ventajas que ofrecen las técnicas heurísticas, en la práctica han tenido limitaciones de uso debido al tiempo que debe invertirse para desarrollar los algoritmos y a la necesidad de contar con personal capacitado en el área. Las heurísticas comúnmente son diseñadas para resolver un problema particular, como resultado, el software desarrollado para un caso específico es difícil de utilizar en otro problema pues cada uno tiene características diferentes, de allí que no existan paquetes de computación estándar que puedan usarse de manera general en planificación forestal. No obstante, tal como lo señalan Baskent y Keles (2005) es importante considerar que una vez desarrollado un algoritmo heurístico para un problema es posible generar en forma rápida muy buenas soluciones, esto puede compensar el esfuerzo requerido.

2.5 Referencias

Baskent EZ, Keles S (2005) Spatial forest planning: A review. *Ecological Modelling* 188: 145-173.

- Bettinger P, Graetz D, Boston K, Sessions J, Chung W (2002) Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica* 36(2): 561–584.
- Bettinger P, Sessions J, Boston K (2009) A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning. *International Journal of Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences* 1: 26-37.
- Bettinger P, Boston K, Kim YH, Zhua J (2007) Landscape-level optimization using tabu search and stand density-related forest management prescriptions. *European Journal of Operational Research* 176: 1265-1282.
- Bettinger P, Sessions J, Boston K (1997) Using Tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game. *Ecological Modelling* 94: 111-123.
- Boston K, Bettinger P (1999) An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. *Forest Science* 45: 292-301.
- Brumelle S, Granot D, Helme M, Vertinsky I (1998) A tabu search algorithm for finding good forest harvest schedules satisfying green-up constraints. *European Journal of Operational Research* 106: 408-424.
- Cabezas CA (2002) Algoritmos Genéticos, una opción para la optimización de funciones. *Tecnología química* 23: 65-69.
- Cerny V (1985) A thermodynamical approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45: 41 – 55.
- Chen BW, Gadov vK (2008) Combining spatial and other objectives in forest design. *Forestry Studies* 48: 30–40.
- Chiari R, Carrero O, Jerez M, Quintero MA, Stock J (2008) Modelo preliminar para la planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales en Venezuela. *Interciencia* 33: 802-809.

- Crowe KA, Nelson JD (2005) An evaluation of the simulated annealing algorithm for solving the area-restricted harvest-scheduling model against optimal benchmarks. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2500-2509.
- Deb K (2000) Introduction to selection. In: *Evolutionary Computation I - Basic Algorithms and Operators*. T. Bäck, D.B. Fogel y Z. Michalewicz (eds.). Institute of Physics Publishing. Bristol, Reino Unido. 166-171 pp.
- Díaz A, Ferland JA, Ribeiro CC, Vera JR, Weintraub A (2007) A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. *European Journal of Operational Research* 179(3): 788-805.
- Dowland KA, Díaz BA (2001) Diseño de Heurísticas y Fundamentos del Recocido Simulado. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 20: 34-52.
- Dahlin B, Sallnas O (1993) Harvest scheduling under adjacency constraints - A case study from the Swedish sub - alpine region. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8: 281 - 290.
- Dréo J, Pétrowski A, Siarry P, Taillard E (2006) *Metaheuristics for hard Optimization*. Springer - Verlag. Berlín, Alemania.
- Ducheyne EI, De Wulf RR, De Baets B (2004) Single versus multiple objective genetic algorithms for solving the even-flow forest management problem. *Forest Ecology and Management* 201: 259-273.
- Falcão AO, Borges JG (2001) Designing an evolution program for solving integer forest management scheduling models: an application in Portugal. *Forest Science* 47: 158-168.
- Falcão AO, Borges JG (2002) Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. *Forest Science* 48: 608-621.
- Glover F (1986) Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research* 13: 533-549.

- Glover F, Melián B (2003) Búsqueda Tabú. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 19: 29-48.
- Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley, Nueva York, EEUU.
- Heinonen T, Pukkala T (2004) A comparison of one- and two-compartment neighbourhoods in heuristic search with spatial forest management goals. *Silva Fennica* 38: 319-332.
- Hertz A., Taillard E, De Werra D (1995) A Tutorial on Tabu Search. In: *Proceedings of Giornate di Lavoro AIRO'95, Entreprise Systems: Management of echnological and Organizational Changes*, pp. 13-24.
- Holland JH (1975) Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Harbor, MI, EEUU.
- Kirpatrick S, Gellat CD, Vecchi MP (1983) Optimization by Simulating Annealing. *Science* 220: 671 – 679.
- Liu G, Han S, Zhao X, Nelson JD, Wang H, Wang W (2006) Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning. *Ecological Modelling* 194: 421-428.
- Lockwood C, Moore T (1993) Harvest scheduling with spatial constraints: a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 468-478.
- Lu F, Eriksson LO (2000) Formation of harvest units with genetic algorithms. *Ecology and Management* 130: 57-67.
- McDill ME, Braze J (2001) Using branch and bound algorithm to solve forest planning problems with adjacency constraints. *Forest Science* 47: 403-418.
- Metropolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, Teller AH, Teller E (1953) Equation of state calculation by fast computing machines. *Journal of Chemistry* 21: 1087 – 1091.
- Murray AT, Weintraub A (2002) Scale and unit specification influences in harvest scheduling with maximum area restrictions. *Forest Science* 48: 779-789.
- Palahí M, Pukkala T, Pascual L, Trasobares A (2004) Examining alternative landscape metrics in ecological forest planning: a case for capercaillie in Catalonia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 13: 527-538.

- Pukkala T, Kurttila M (2005) Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica* 39: 67 – 80.
- Reeves CR (1996) Modern Heuristic Techniques. In: Rayward-Smith VJ, Osman IH, Reeves CR, Smith GD (Eds.), *Modern Heuristic Search Methods*. Jon Wiley & Sons. Chichester, Inglaterra. pp 1- 25.
- Richards EW, Gunn E (2000) A Model and tabu search method to optimize stand harvest and road construction schedules. *Forest Science* 46: 188-203.
- Richards EW, Gunn E (2003) Tabu search design for difficult forest management optimization problems. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1126-1133.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, De Souza AL (2003) Solução de problemas de planejamento florestal com restrições de inteireza utilizando Busca Tabu. *Árvore* 27: 701-713.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, De Souza AL, Silva GF (2004 a) Metaheurística algoritmo genético para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árvore* 28: 233-245.
- Rodrigues FL, Leite HG, Santos HN, De Souza AL, Silva GF (2004 b) Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árvore* 28: 247-256.
- SAS (2004) SAS/OR 9.1 *User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC, EEUU.
- Tarp P, Helles F (1997) Spatial optimization by simulated annealing and linear programming. *Scandinavian Journal of Forest Research* 12: 390-402.
- Thompson MP, Hamann JD, Sessions J (2009) Selection and penalty strategies for genetic algorithms designed to solve spatial forest planning problems. *International Journal of Forestry Research* 2009: 1-14.
- Voß S (2001) Meta-heuristics: The State of the Art. In: Nareyek A (Eds.), *Local Search for Planning and Scheduling*. Springer – Verlag, Berlin, Alemania. pp 1 – 23.
- Zhu J, Bettinger P (2008) Assessment of three heuristics for developing large-scale spatial forest harvest scheduling plans. *Journal of Applied Sciences* 8: 4113-4120.

CAPÍTULO III

MODELO DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA PARA PRESCRIBIR REGÍMENES DE ACLAREO EN PLANTACIONES FORESTALES

3.1 Introducción

Los aclareos juegan un papel importante en el manejo de plantaciones forestales, ya que son tratamientos silviculturales que pueden afectar considerablemente el desarrollo de una masa forestal. Un aclareo o raleo se define como una corta intermedia realizada en un rodal para remover árboles de forma y calidad indeseables y así concentrar el potencial productivo del sitio en los árboles de mayor valor comercial. Mediante los aclareos los técnicos forestales pueden manipular la competencia y modificar la densidad de una plantación con el fin de lograr el mayor beneficio económico de su explotación. Los aclareos permiten acelerar el crecimiento en diámetro, lo que conlleva a acortar el turno, aumentar el porcentaje de árboles que alcanzan la madurez, mejorar la calidad de la madera, y obtener rendimientos intermedios, entre otros beneficios (Chaves, 2003).

Algunos productos forestales, tal como la madera de aserrío, sólo se pueden obtener de árboles con ciertas dimensiones mínimas. A medida que el crecimiento de los árboles sobrepasa estas dimensiones, su rendimiento y valor aumentan. Los árboles grandes también son más valiosos debido a la calidad superior de su madera para la mayoría de los productos (Wadsworth, 2000). Por esta razón, cuando la finalidad de la plantación es producir árboles para aserrío es una práctica común realizar intervenciones silviculturales como los aclareos, los cuales pueden influir en el éxito económico de una plantación, al estar relacionados a factores como turno, dimensiones (diámetro) y calidad (según tamaño y forma).

La prescripción de aclareos es uno de los principales problemas que se presentan en el manejo de plantaciones, junto con la determinación del turno óptimo y la definición de métodos de regeneración (Davis, 2001). La intensidad y el momento en que se realizan los aclareos influyen de manera importante sobre el ritmo de crecimiento y el rendimiento de la plantación. Si el aclareo se demora, las tasas de crecimiento descienden o se paralizan, mientras que si el aclareo es prematuro o demasiado intenso, los árboles tienen mayor tendencia a producir ramas laterales y brotes superficiales; esto reduce el rendimiento potencial de la plantación, ya que el crecimiento se desvía del tronco principal, que debería estar libre de defectos como los causados por ramas laterales y brotes superficiales (Fonseca, 2004).

Según Vincent (1980) para cada especie y para cada calidad de sitio debe haber un régimen óptimo de aclareo, el cual permitirá que se logre producir la madera en la forma más económica posible. El problema consiste en determinar cuándo aclarear, qué tipo de aclareo realizar y cuál debe ser el porcentaje de extracción de árboles (intensidad del aclareo). La planificación de los aclareos no es un problema sencillo puesto que involucra una serie de aspectos, entre los que se encuentran:

- Proyección del crecimiento de los árboles, el cual varía de acuerdo a la especie, edad, calidad de sitio, espaciamiento inicial.
- Relación entre la productividad y el régimen de aclareos.
- Determinación del número de cortas más indicado.
- Selección de la edad en las que se pueden realizar los aclareos entre las diferentes opciones factibles.
- Evaluación de un gran número de niveles de densidad residual después de un aclareo.

Además, la interacción entre las variables intervinientes también hace que el problema sea complejo, por ejemplo, la intensidad de un aclareo en un momento determinado puede afectar la intensidad de los aclareos siguientes y la tasa de crecimiento de los árboles que quedan después de un aclareo puede cambiar (Bettinger *et al.*, 2009).

Se han usado varios enfoques para abordar la programación de raleos en un rodal. Una práctica ha sido establecer ensayos de campo con diferentes espaciamientos iniciales y distintos regímenes de aclareo, con la finalidad de estudiar el comportamiento del rodal en el tiempo de acuerdo a los tratamientos aplicados; la desventaja es que la información que producen estos ensayos es a largo plazo y para un número limitado de regímenes silviculturales. Obviamente, es imposible analizar la respuesta de una masa forestal para cada opción silvicultural mediante experimentación directa, sin embargo, los datos obtenidos mediante ensayos brindan información muy valiosa que sirve para la construcción de modelos de crecimiento más generales.

Para estudiar la dinámica de un rodal y analizar los efectos de distintos tratamientos silviculturales también se utilizan modelos de simulación del crecimiento y rendimiento, estos constituyen una herramienta muy útil para los planificadores forestales ya que permiten probar una amplia variedad de opciones de manejo. En el caso concreto de los aclareos, se puede evaluar la respuesta de un rodal a diferentes regímenes, variando la frecuencia y la intensidad de los mismos. Es posible proyectar el rendimiento por tipo de producto, volumen por tamaños y clases de calidad, y los beneficios que podrían obtenerse de la aplicación de un régimen de aclareo particular.

Un tercer enfoque para prescribir regímenes de aclareo es el uso de modelos de optimización. Con frecuencia, el objetivo es determinar el régimen de aclareos que maximice los beneficios económicos obtenidos del bosque, sin embargo, más recientemente se ha incrementado el interés en incluir consideraciones ambientales en los modelos. Por lo general, los modelos de optimización trabajan en conjunto con un modelo de crecimiento y rendimiento. Este último calcula el valor de la función objetivo dado un conjunto de parámetros de manejo como edad e intensidad de las cortas, y el modelo de optimización cambia en forma sistemática el valor de esos parámetros de manera tal que se optimice la función objetivo (Pukkala y Miina, 2005).

Las técnicas de optimización que se utilizan para modelar problemas a nivel rodal, tales como la determinación del régimen óptimo de aclareo, pueden agruparse en cuatro

categorías: Programación Dinámica, Programación No Lineal, el método de Hooke y Jeeves, y técnicas heurísticas (Bettinger *et al.*, 2005).

La Programación Dinámica es un enfoque general para la solución de problemas en los que es necesario tomar decisiones en etapas sucesivas, llamados problemas de decisión secuenciales o polietápicos. En cada una de las etapas, se debe tomar una decisión con el objetivo de maximizar o minimizar cierta función que mide la bondad de las decisiones adoptadas, la decisión tomada en una etapa condiciona la decisión en la etapa siguiente. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada para desarrollar regímenes de manejo óptimos a nivel de rodal, en los que el tiempo se representa mediante etapas y las decisiones están relacionadas a variables de manejo. Entre las muchas aplicaciones de esta técnica en la programación de raleos pueden citarse los trabajos de Amidon y Akin (1968), Brodie *et al.* (1978), Kao y Brodie (1979), Paredes y Brodie (1987), Arthaud y Klemperer (1988), Brukas y Brodie (1999). La principal ventaja de la Programación Dinámica es que permite examinar un número grande de alternativas de manejo predefinidas, sin la necesidad de evaluar cada una de ellas, sin embargo, cuando se incrementa el número de variables en cada etapa, las limitantes computacionales se vuelven sumamente serias, a esto se le llama “problema de dimensionalidad” (Taha, 2004).

La programación no lineal permite determinar la solución óptima de problemas en los que la función objetivo y las restricciones son funciones no lineales. La estructura del problema puede ser muy variada según las funciones que en él intervengan, lo que ocasiona dificultad en la obtención numérica de las soluciones. Una desventaja importante es que no existe un algoritmo general, tal como el método simplex en programación lineal, que pueda ser utilizado para solucionar todos los problemas de programación no lineal. Entre las aplicaciones de esta técnica en la optimización del manejo a nivel de rodal están las investigaciones de Adams y Ek (1974), Kao y Brodie (1980), Roise (1986), Gove y Fairweather, (1992), Hyytiäinen y Tahvonen (2002).

Por su parte, el método de Hooke y Heeves (1961) se trata de un procedimiento de búsqueda directa que consiste en ir cambiando la solución en forma sistemática,

considerando incrementos en cada una de las variables de decisión. Cada nueva solución es evaluada y comparada con la mejor solución encontrada que se halla almacenada en memoria, el proceso se repite hasta que se llega una tolerancia fijada de antemano. El procedimiento es similar al utilizado en las técnicas heurísticas avanzadas, se diferencia en que no usa estrategias para aceptar soluciones que desmejoran el valor objetivo con la finalidad de explorar nuevas áreas en el espacio de soluciones (Bettinger *et al.*, 2005). Esta técnica ha dado buenos resultados en problemas de prescripción de aclareos, pueden citarse los trabajos de Roise (1986), Valsta (1990), Yoshimoto *et al.* (1990), Pukkala y Miina (1997), Palahi y Pukkala (2003), Hyytiäinen *et al.* (2005), Pukkala (2009).

Algunas técnicas heurísticas también se han utilizado para solucionar modelos de manejo forestal a nivel de rodal, tales como Búsqueda Aleatoria (Bullard *et al.*, 1985; Valsta, 1990), Búsqueda Tabú (Wikström y Eriksson, 2000; Wikström; 2001) y métodos basados en poblaciones como Evolución Diferencial, Optimización por Enjambre de Partículas, Estrategias Evolutivas y el método de Nelder-Mead (Pukkala, 2009). Otras heurísticas empleadas en optimización combinatoria como Recocido Simulado y Algoritmos Genéticos, no han sido utilizadas en problemas de optimización a nivel de rodal.

En este capítulo se propone un modelo para la planificación de regímenes de aclareos en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.). El objetivo fue desarrollar un modelo de optimización heurística basado en la simulación del crecimiento y rendimiento, para determinar la edad e intensidad en que deben aplicarse los aclareos en un rodal de acuerdo a consideraciones biológicas y financieras. La optimización tiene como función objetivo la maximización de los beneficios económicos y está sujeta a restricciones de área basal, las cuales tienen su fundamento en el Modelo de Área Basal y la Teoría de Möller. La técnica heurística empleada para resolver el modelo fue Algoritmos Genéticos, por ser una técnica robusta que ha mostrado un excelente desempeño en problemas de optimización.

El modelo de prescripción de aclareos, al igual que los modelos que se presentan en los siguientes capítulos, fue desarrollado para teca, debido a que Venezuela posee potencial

para su producción a gran escala, es una especie de alto valor comercial y presenta gran demanda a nivel internacional por tener una amplia gama de usos. Además, se cuenta con datos que se han recolectado en parcelas permanentes de crecimiento y rendimiento de teca establecidas en las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo, los cuales se han utilizado para llevar a cabo una serie de investigaciones en la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes, relacionadas al manejo de esta especie. Otra motivación que condujo a desarrollar un modelo para esta especie forestal se debe a que la determinación del régimen de aclareos, constituye el principal problema en la fase de manejo de la teca, pues según Vincent (1989), se requieren intervenciones periódicas de raleos en las plantaciones de teca para concentrar la productividad del sitio en árboles seleccionados de acuerdo a su forma y distribución espacial.

Aunque en la literatura se encuentran numerosos estudios sobre el manejo de plantaciones de teca, los cuales van desde lo estrictamente “empírico” hasta criterios más elaborados basados en especificaciones técnicas, ninguno de estos utiliza modelos de optimización. Por ello, es importante explorar este enfoque como una vía para determinar los mejores regímenes de aclareo bajo ciertas condiciones como densidad inicial y calidad de sitio; un modelo de optimización con estas características puede ser muy útil en los procesos de toma de decisiones.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Modelo de Área Basal

Es un enfoque utilizado para la especificación de aclareos y la formulación del régimen de espesura, refiriéndose este último al espaciamiento inicial y el conjunto de aclareos integrados en un régimen coherente. El área basal de un rodal, expresado en $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$ relaciona la densidad del rodal (árboles ha^{-1}) con la sumatoria del área transversal (m^2) de los fustes de los árboles medidos a 1,30 m de altura (diámetro a la altura de pecho) por hectárea. El área basal es un buen indicador del grado de ocupación de un sitio (nivel de

competencia ó espesura) y tiene buena correlación con el volumen del rodal. El modelo de área basal se fundamenta en la teoría de Möller, según la cual existe un rango de densidades (ocupación del rodal) en el que el incremento periódico en área basal es máximo y se puede considerar, entonces, que el sitio está ocupado de manera óptima, siendo los recursos del sitio aprovechados por los árboles de la manera más eficiente posible (Vincent, 1985).

El modelo de área basal del rodal como método de diseño del régimen de aclareo tiene tres puntos de referencia:

1. El área basal potencial del sitio (AB_{ps}) que representa la capacidad de carga del sitio para la especie bajo consideración.
2. El área basal máxima (AB_{max}) que es la mayor espesura para la cual se obtiene el incremento máximo en área basal.
3. El área basal limitante (AB_{lim}) que corresponde a la espesura mínima para la cual se obtiene el incremento máximo en área basal.

Cuando el área basal de la masa forestal está por debajo del área basal limitante, hay un uso incompleto del potencial productivo del sitio; y cuando está por encima del área basal máxima, hay una competencia excesiva, producto de la “sobre-ocupación” del sitio. Entre el área basal limitante y el área basal máxima el incremento en área basal es máximo y según la teoría de Möller, constante. En la Figura 3.1 se muestra el desarrollo del área basal con la edad, apreciándose una etapa de establecimiento en la cual el crecimiento es reducido y aumenta con el tiempo (período entre 0 y C1), una etapa en la que el crecimiento es máximo (entre C1 y C2), y una etapa de disminución del crecimiento hasta alcanzar la capacidad de carga del sitio (entre C2 y C3), donde el crecimiento de algunos árboles del rodal, es compensado con la mortalidad de otros. En la Figura 3.2 se puede observar la relación existente entre el incremento periódico anual (IPA) de área basal y la espesura en términos del área basal, en este gráfico se aprecia que el crecimiento es máximo y constante entre el área basal limitante y el área basal máxima.

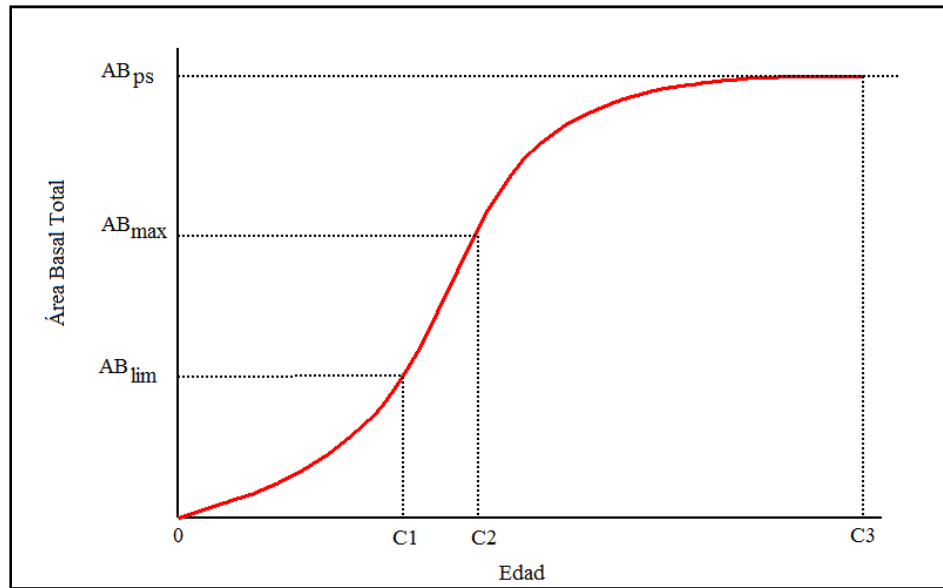


Figura 3.1 Desarrollo del área basal en función de la edad y puntos críticos del modelo de área basal. Fuente: Vincent, 1985.

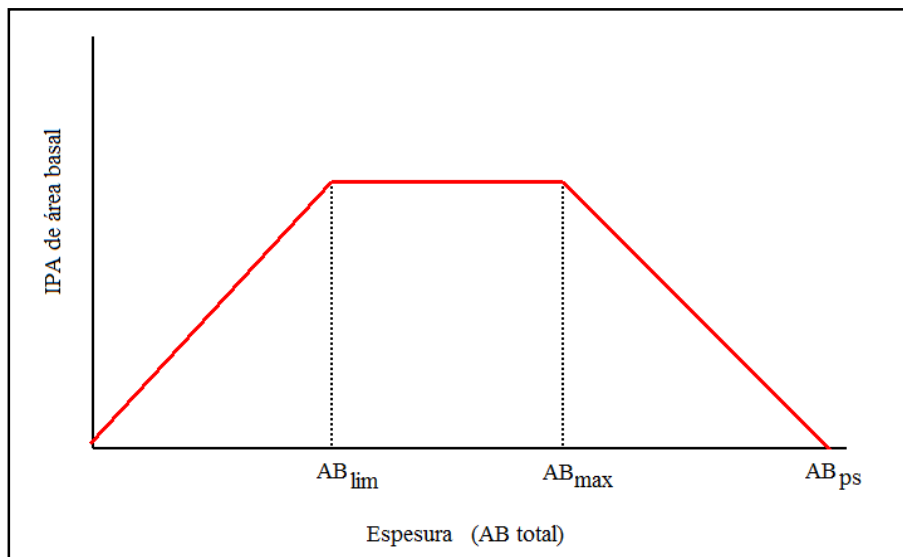


Figura 3.2. Relación entre el IPA de área basal y espesura en términos del área basal. Fuente: Vincent, 1985.

3.2.2 Estructura y supuestos del modelo

Se desarrolló un modelo de optimización que determina un régimen de aclareo para un rodal de teca, el cual maximiza los beneficios económicos obtenidos de la producción de madera para aserrío. En el contexto del modelo, un régimen de aclareo se refiere a número de aclareos, edad e intensidad de los mismos. El número de aclareos no fue optimizado, sino que se consideró un dato de entrada del modelo, los valores permitidos para esta variable van desde un aclareo hasta cuatro aclareos, la acción de no efectuar aclareos también se considera una alternativa. Así, cada número de aclareos conforma un problema de optimización diferente con un número determinado de variables de decisión.

El modelo consta de dos módulos, el primero simula el crecimiento y rendimiento, permitiendo calcular variables de rodal como área basal, densidad, diámetro promedio, volumen y altura, bajo diferentes regímenes de aclareo. El segundo módulo comprende el modelo de optimización, cuya función objetivo es la maximización del valor actual neto (VAN) de los flujos de caja ocurridos durante el turno relacionados con los aclareos y la corta final, incluyendo costos de establecimiento y mantenimiento, costo de corta y los ingresos obtenidos por la venta de la madera aprovechada en los aclareos y en la corta final, se ignora el valor de la tierra de acuerdo al criterio de valor presente neto propuesto por Hille *et al.* (1999), el cual es utilizado en modelos de optimización forestal (Seo *et al.*, 2005; Chen y Gadow, 2008; Baskent *et al.* 2008). La función objetivo está sujeta a restricciones que buscan mantener el área basal del rodal entre el área basal limitante y el área basal máxima, de acuerdo al Modelo de Área Basal y la teoría de Möller.

El módulo de optimización evalúa múltiples soluciones, cada una de las cuales corresponde a un régimen de aclareo. Para valorar una solución llama al módulo de crecimiento y rendimiento, que se encarga de calcular el valor de las variables de rodal para cada año del turno, correspondiente al régimen de aclareo que se está evaluando. El módulo de crecimiento permite estimar datos como volumen y diámetro del árbol medio (diámetro del árbol de área basal promedio) del vuelo aclareado y de la corta final, los cuales se utilizan para calcular el valor de la función objetivo o valor actual neto (VAN) de

una solución. El régimen de aclareo que presenta un mayor VAN se considera la solución del modelo. En la Figura 3.3 se muestra un diagrama que ilustra el funcionamiento del modelo.

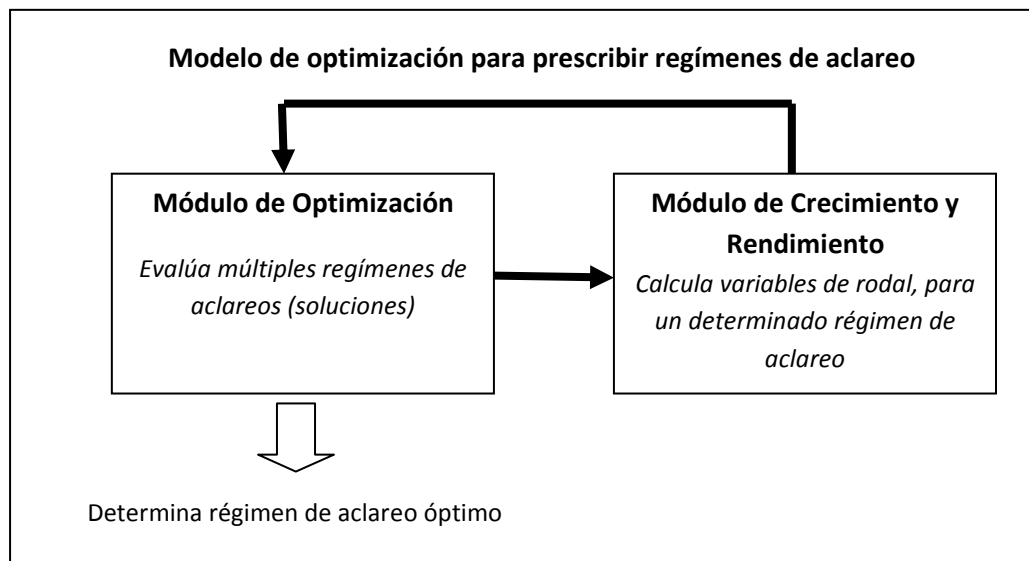


Figura 3.3. Diagrama de funcionamiento del modelo de prescripción de aclareos

Los supuestos bajo los cuales se desarrolló el modelo son los siguientes:

- El turno es de 30 años.
- El primer aclareo se puede hacer a partir de los 5 años.
- Los aclareos tienen un distanciamiento mínimo de 3 años. Por tanto, el último aclareo se puede hacer 3 años antes del turno, es decir a los 27 años.
- Se asume una mortalidad del 15% en la fase de establecimiento. En la fase manejo no se toma en cuenta la mortalidad si el régimen de manejo contempla realizar aclareos, en estos casos la mortalidad no es significativa. Cuando el régimen de manejo no incluye aclareos, se incorpora una ecuación de mortalidad.

3.2.3 Módulo de crecimiento y rendimiento

Este módulo calcula para cada año del turno y para un determinado esquema de aclareos las siguientes variables: área basal, densidad, diámetro del árbol medio, volumen y altura, para el vuelo principal al inicio y al final del período, y para el vuelo removido.

Estimación del Área Basal

Para simular el crecimiento en área basal se utilizó el modelo ajustado por Zambrano (1993) y por Zambrano *et al.* (1995) para plantaciones de teca establecidas en la Reserva Forestal de Ticoporo, Estado Barinas. Este modelo utiliza la ecuación de Chapman-Richards (Richards, 1959), expresión matemática relacionada con las causas del crecimiento, en la que sus parámetros tienen una cierta interpretación fisiológica o biológica. El modelo de Chapman-Richards es de utilidad en el estudio de vuelos no aclareados de diferentes densidades iniciales, así como también en vuelos aclareados, siendo aplicable para modelar el crecimiento en área basal (Pienaar y Turnbull, 1973).

La ecuación de Chapman-Richards aplicada al área basal se expresa como:

$$AB_t = AB_{ps} [1 - e^{-k(t-t_o)}]^{1-m} \quad [3.1]$$

donde AB_t es el área basal a estimar en el tiempo t (m^2ha^{-1}), AB_{ps} es el área basal potencial de sitio (m^2ha^{-1}), t_o es el tiempo inicial de medición del área basal (años), t es la edad (años), k y m son parámetros de la ecuación que deben ser estimados.

En el modelo se utilizó el Incremento Corriente Anual del área basal (ICA), cuya expresión matemática se obtiene al derivar la ecuación [3.1]:

$$ICA(t, t-1) = k \times AB_{f_{t-1}} \left[\frac{\left(\frac{AB_{ps}}{AB_{f_{t-1}}} \right)^{1-m} - 1}{1-m} \right] \quad [3.2]$$

donde $AB_{f_{t-1}}$ es el área basal al final del período $t-1$ (m^2ha^{-1}), AB_{ps} es el área basal potencial de sitio (m^2ha^{-1}), t es la edad (años), k y m son parámetros a estimar.

El coeficiente k se relaciona con la tasa de crecimiento del rodal. Para simular cambios en la tasa de crecimiento después de un aclareo, el modelo modifica automáticamente el valor de k después de cada aclareo. La ecuación utilizada para calcular el valor de k es la siguiente (Pienaar y Turnbull, 1973):

$$k = \frac{\left| \ln \left[1 - \left(\frac{AB_t}{AB_{ps}} \right)^{1-m} \right] \right|}{t - t_0} \quad [3.3]$$

donde AB_t es el área basal en el tiempo t ($m^2 ha^{-1}$), AB_{ps} es el área basal potencial de sitio ($m^2 ha^{-1}$), t_0 es el tiempo inicial de medición del área basal (años), t es la edad (años), m es un parámetro del modelo.

Cálculo de la Densidad

La densidad inicial es un dato de entrada del modelo, de acuerdo a este valor se utilizan los valores de los parámetros k y m estimados por Zambrano (1993). Se asume que durante la fase de establecimiento hay una mortalidad del 15%, por lo tanto al final del tercer año hay una densidad final igual al 85% de la densidad inicial.

Luego, en los años siguientes, la densidad inicial, la densidad aclareada y la densidad al final de un período, se calculan de la siguiente manera:

Densidad Inicial

$$No_t = Nf_{t-1} \quad [3.4]$$

donde No_t es la densidad al inicio del año t y Nf_{t-1} es igual a la densidad al final del período anterior $t-1$, ambas en árboles por hectárea ($arb ha^{-1}$); se asume que la mortalidad es igual a 0.

Densidad aclareada

Se utiliza la siguiente ecuación para relacionar el área basal aclareada con el número de árboles extraídos (Oscar García, comunicación personal, Noviembre 2010):

$$Nacl_t = No_t - No_t \times \left(\frac{ABf_t}{ABO_t}\right)^{\frac{1}{f}} \quad [3.5]$$

donde No_t es la densidad al inicio del período t , ABf_t es el área basal al final del período t , ABO_t es el área basal al inicio del período t , y f es un factor de aclareo. Se asume un aclareo por lo bajo, el cual puede representarse con $f= 0,75$.

Densidad final

En cada año se calcula la densidad final de la siguiente manera:

$$Nf_t = No_t - Nacl_t \quad [3.6]$$

donde Nf_t es la densidad al final de un año t , No_t corresponde a la densidad al inicio de ese año y $Nacl_t$ es el número de arboles aclareados en el año t , todos expresados en arb ha⁻¹.

Estimación del diámetro del árbol medio

El diámetro a la altura de pecho del árbol medio (cm) se calcula se la siguiente forma:

$$D_t = \sqrt{\frac{4AB_t}{\pi \times N_t}} \times 100 \quad [3.7]$$

Se calcula el diámetro del árbol medio al inicio y al final de un período t , así como también el diámetro del árbol medio del vuelo aclareado, usando los valores de área basal AB y número de árboles N correspondientes a cada caso.

Estimación de altura total

Se utilizó el modelo ajustado por Zambrano *et al.* (2001) para estimar la relación de la altura total (h) en función del diámetro a la altura de pecho (d) en parcelas permanentes de rendimiento y aclareo establecidas en plantaciones de teca ubicadas en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas.

$$h = 33,6114369 \times e^{-\frac{8,7143811}{d}} \quad [3.8]$$

Estimación del Volumen

Se usó el modelo logarítmico de variable combinada ajustado por Moret *et al.* (1998) para estimar el volumen sin corteza (VSC) y con corteza (VCC) en plantaciones de teca de la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo:

$$VSC = 0,26005789 \times (d^2h)^{0,963638} \quad [3.9]$$

$$VCC = 0,34337814 \times (d^2h)^{0,9338306} \quad [3.10]$$

donde d es el diámetro a la altura de pecho y h la altura total.

3.2.4 Modelo matemático

El problema de prescripción de aclareos se representa mediante un modelo de optimización restringida. Las variables de decisión que permiten definir distintos regímenes de aclareo, la función objetivo a optimizar y las restricciones del modelo se especifican a continuación.

Variables de decisión

A_j : número de años transcurridos desde el año 0 (si es el primer aclareo, $j=1$) o desde el aclareo anterior, para efectuar un nuevo aclareo j .

I_j : intensidad del aclareo j , expresado en porcentaje del área basal extraída.

Función objetivo

Corresponde a la maximización del valor actual neto de los flujos de caja ocurridos durante el turno y que están relacionados a las cortas. Incluye costos de establecimiento, costos de mantenimiento, costos e ingresos referentes a los aclareos y la corta final.

$$\text{Maximizar } VAN = - \sum_{i=1}^t \frac{Cm_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^{t-3} \left(\frac{\text{Ingreso}_i - \text{Costo}_i}{(1+r)^i} \right) + \frac{\text{Ingreso}_t - \text{Costo}_t}{(1+r)^t} \quad [3.11]$$

donde:

t : es el turno que para este caso se fijó en 30 años.

r : tasa de interés.

Cm_i : costo de establecimiento o costo de mantenimiento en el año i .

Ingreso_i : ingreso neto percibido en el año i debido a la venta de madera extraída en un aclareo o a la corta final. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ingreso}_i = P \times V_i \quad [3.12]$$

Siendo P el precio por metro cúbico de madera rolliza, el cual varía dependiendo del diámetro promedio de los árboles extraídos; y V_i el volumen extraído en el aclareo i o en la corta final.

Costo_i : costo del aclareo i o de la corta final.

$$\text{Costo}_i = C \times V_i \quad [3.13]$$

Se considera que el costo de una corta, ya sea aclareo o corta final, se calcula a partir de C que es el costo de cortar un metro cúbico de madera y el volumen extraído V_i .

Restricciones

El problema está sujeto al siguiente conjunto de restricciones:

$$ABO_i \leq AB_{max} \quad [3.14]$$

$$ABf_i \geq AB_{lim} \quad [3.15]$$

$$ABO_{i+1} = ABf_i + ICA_{i+1,i} \quad [3.16]$$

$$ABacl_i = I_i \times ABo_i \quad [3.17]$$

$$ABf_i = ABo_i - ABacl_i \quad [3.18]$$

$$A_1 \geq 5 \quad [3.19]$$

$$A_i \geq 3 \quad \text{para } i = 2, 3, 4 \quad [3.20]$$

$$I_i \geq 0 \quad \forall i \quad [3.21]$$

$$A_j \text{ es entera} \quad \forall j \quad [3.22]$$

donde:

ABo_i : área basal al inicio del año i ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$).

ABf_i : área basal al final del año i ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$).

$ABacl_i$: área basal aclareada en el año i ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$).

AB_{max} : área basal máxima ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$).

AB_{lim} : área basal limitante .

Las desigualdades [3.14] y [3.15] corresponden a las restricciones de área basal, las cuales tienen como finalidad mantener esta variable en el intervalo definido por el área basal limitante y el área basal máxima (parámetros del Modelo de Área Basal). Las restricciones [3.16], [3.17] y [3.18] se refieren a las fórmulas de cálculo del área basal inicial, área basal aclareada y área basal final para un año del período de planificación, estos valores se determinan a partir modelo de crecimiento y rendimiento y en función de las variables de decisión. La restricción [3.19] está relacionada al supuesto del modelo que establece que el primer aclareo se puede realizar a partir de los 5 años de edad del rodal y la restricción [3.20] indica que entre dos aclareos sucesivos deben transcurrir al menos tres años.

3.2.5 Técnica de solución

El modelo de optimización planteado incluye ecuaciones no lineales mediante las cuales se estima el crecimiento en área basal del rodal, así como también las variables volumen, altura total y diámetro del árbol medio, por lo que podría abordarse mediante programación no lineal. Primeramente, se utilizó el programa Solver de Excel 2010 (Microsoft Corporation, 2010), el cual permite la aplicación de técnicas de optimización y utiliza algoritmos diseñados para tal fin, sin embargo, en ningún caso pudo encontrar una solución.

Para resolver el modelo, se procedió entonces a utilizar una técnica heurística, específicamente Algoritmos Genéticos, ya que estos han sido utilizados con bastante éxito en una gran cantidad de problemas en diferentes áreas del conocimiento, para alcanzar soluciones óptimas o cercanas al óptimo cuando los métodos exactos presentan dificultades, destacándose por ser una técnica de optimización robusta y eficiente (Dréo *et al.*, 2006). Además, tal como se menciona en la introducción de este capítulo, los Algoritmos Genéticos no se han utilizado para resolver modelos de planificación del manejo forestal a nivel de rodal, por lo se espera que este trabajo sea un aporte en este particular.

En la implementación del Algoritmo Genético se aplicaron las siguientes estrategias de diseño:

Representación de una solución

Las variables de decisión del modelo son de dos tipos, los años transcurridos antes del primer aclareo o entre aclareos (A_j), es una variable entera, y la intensidad de cada aclareo (I_j) es continua. Para representar cada variable se utilizó codificación binaria. En este tipo de representación es necesario determinar cuántos bits se requieren para representar un número, el procedimiento utilizado para tal fin es el siguiente:

1. Determinar el intervalo de la recta sobre el cual toma valores la variable a representar $[a, b]$
2. Calcular la longitud del intervalo ($L = b - a$)
3. Establecer la precisión deseada (P) o lo que es igual, el número de decimales que se quieren representar.
4. Calcular el número de bits necesarios para representar la cantidad $L \times 10^P$, determinando la potencia de 2 que permite representar esa cantidad.

Así, una solución del modelo se representa mediante un vector de 0's y 1's. Cada variable de decisión del modelo ocupa cierta cantidad de bits o elementos del vector, dependiendo del rango de valores que puede tomar y de su precisión. El tamaño del vector solución varía de acuerdo al número de aclareos, ya que este determina la cantidad de variables de decisión. En la Tabla 3.1 se presenta el número de bits utilizado para representar las variables de decisión del modelo. En esta tabla se puede ver que el número de bits necesario para cada variable es diferente dependiendo de número de aclareos, por ejemplo, para el caso en el que se consideran dos aclareos se requieren 30 bits para representar una solución; 5 bits para la variable A_1 , 5 bits para A_2 , 10 bits para la intensidad del primer aclareo, y 10 bits para la intensidad del segundo aclareo.

En la Tabla 3.2 se presenta el número total de bits necesarios para representar una solución en código binario dependiendo del número de aclareos.

Tabla 3.1. Datos para la representación de las variables del modelo en código binario

Nº de aclareos	Variables de decisión				
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	I _j
1 aclareo					
a	5	-	-	-	10
b	27	-	-	-	80
Precisión	0	-	-	-	1
Nº de bits	5	-	-	-	10
2 aclareos					
a	5	3	-	-	10
b	24	22	-	-	80
Precisión	0	0	-	-	1
Nº de bits	5	5	-	-	10
3 aclareos					
a	5	3	3	-	10
b	21	19	19	-	80
Precisión	0	0	0	-	1
Nº de bits	4	4	4	-	10
4 aclareos					
a	5	3	3	3	10
b	18	16	16	16	80
Precisión	0	0	0	0	1
Nº de bits	4	4	4	4	10

A₁: años transcurridos antes del primer aclareo, A₂: años transcurridos entre el primer y segundo aclareo, A₃: años transcurridos entre el segundo y tercer aclareo, A₄: años transcurridos entre el tercer y cuarto aclareo, I_j: intensidad de los aclareos, a: límite inferior del intervalo de valores de una variable, b: límite superior del intervalo de valores de una variable.

Tabla 3.2. Número de bits necesarios para representar una solución

Nº de aclareos	Nº de bits
1	15
2	30
3	42
4	56

En el vector solución, los primeros bits corresponden a los años transcurridos antes del primer aclareo (A_1), luego la variable intensidad del primer aclareo (I_1), seguido por las variables correspondientes a los años transcurridos entre el primer y segundo aclareo (A_2), intensidad del segundo aclareo (I_2), y así sucesivamente. En la Figura 3.4 se presenta como ejemplo la disposición del vector que representa una solución cuando se desea aplicar dos aclareos.

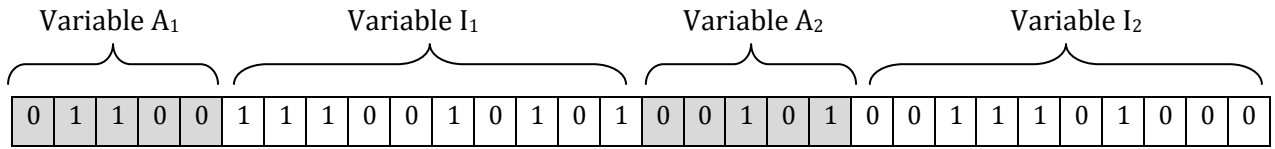


Figura 3.4. Representación de una solución que incluye 2 aclareos

Solución inicial

La solución inicial del Algoritmo Genético corresponde a una población de N individuos o soluciones. Todas las soluciones de la población inicial se generaron aleatoriamente, a cada elemento del vector correspondiente a una solución se le asignó de manera aleatoria 0 o 1, con igual probabilidad para ambos valores.

Función de adaptación

Está representada por la función objetivo del problema y una penalización por el incumplimiento de las restricciones de área basal (ecuaciones 3.14 y 3.15). La función de adaptación o *fitness* se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$FIT(\mathbf{X}) = Fobj + P \sum_{i=5}^{t-1} [(AB_{lim} - ABf_i)I_i + (ABo_i - AB_{max})J_i] \quad [3.23]$$

donde $Fobj$ es la función objetivo del problema (ecuación [3.11]), P es el valor de penalización que se aplica a la violación de las restricciones de área basal, t corresponde al turno, AB_{lim} es el área basal limitante, AB_{max} es el área basal máxima, ABf_i representa

área basal al final del período i , ABo_i es el área basal al inicio del período i , I_i es una variable indicadora que vale 1 si el área basal al final del año i es menor que el área basal limitante y 0 en otro caso, J_i es una variable indicadora que vale 1 si el área basal al inicio del año i es mayor que el área basal máxima y 0 en otro caso. La sumatoria comienza en el año 5 debido a que antes de ese año no se permiten aclareos, y termina un año antes del turno, ya que en el turno se hace la corta final del rodal

Operadores genéticos

En el algoritmo se incluyeron los operadores genéticos básicos de selección, mutación y cruzamiento.

- Selección: se aplicó el método de selección proporcional y el método de la ruleta para elegir los individuos (soluciones) que son cruzados en una iteración para dar origen a otros individuos. Ambos procedimientos fueron propuestos por Holland (1975) y se detallan en el capítulo II.
- Cruzamiento: se utilizó cruzamiento de dos puntos con una probabilidad P_c . En este caso se eligen aleatoriamente dos números P1 y P2 entre 0 y el tamaño del vector solución (ambos sin incluir), los hijos se obtienen al intercambiar en cada padre los genes que están a partir de la posición P1 hasta la posición P2. De esta manera, se obtienen dos nuevas soluciones “hijas” a partir de dos soluciones “padres”.
- Mutación: para aplicar mutación en una solución, se examina cada gen o elemento del vector y de acuerdo a una probabilidad P_m se cambia su valor, si vale 0 se le asigna 1 y viceversa.

Parámetros del Algoritmo Genético

Los parámetros necesarios para correr el Algoritmo Genético son: tamaño de la población (N), probabilidad de cruzamiento (P_c), probabilidad de mutación (P_m) y número máximo de iteraciones del algoritmo (K_{max}), este último es el criterio de parada utilizado. Los valores de los parámetros se determinaron mediante experimentación.

3.2.6 Implementación del modelo

El modelo se implementó utilizando el lenguaje de programación Visual Basic 2010 (Microsoft Corporation, 2012). El programa desarrollado necesita como entrada los siguientes datos: calidad de sitio del rodal, pudiéndose elegir entre dos opciones, calidad de sitio I y calidad de sitio II, estas se definen por el valor del área basal potencial que puede alcanzar el rodal o capacidad de carga (37,5 y 32 m² ha⁻¹, respectivamente); densidad inicial (1111 o 1600 arb ha⁻¹); costo de realizar una corta (\$ m⁻³); precio de la madera rolliza por categoría diamétrica (\$ m⁻³), y número de aclareos a considerar. Los parámetros del Algoritmo Genético están predefinidos, pero si se desea pueden cambiarse sus valores.

El programa incorpora el módulo de crecimiento y rendimiento, y el módulo de optimización con el Algoritmo Genético que busca la mejor solución. En la Figura 3.5 se presenta el diagrama de flujo general del modelo.

Como salidas, el programa muestra el mejor régimen de aclareo encontrado por el Algoritmo Genético, indicando edad e intensidad en área basal de cada aclareo. También calcula el valor actual neto (VAN) de la solución y presenta una tabla con los valores de las variables de rodal durante cada año del turno. En el Anexo A se muestra la interfaz del programa con las ventanas de entrada y salida.

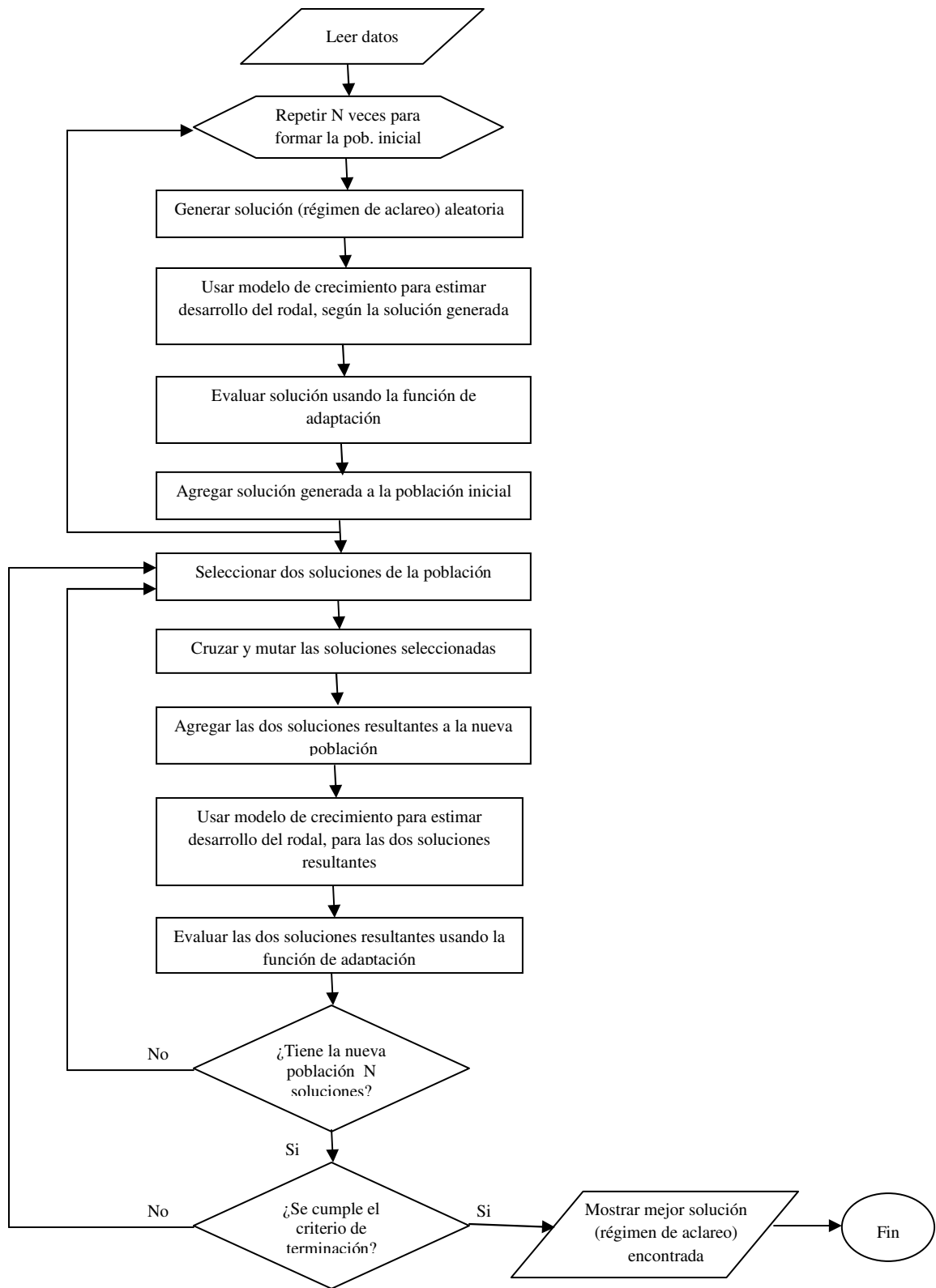


Figura 3.5. Diagrama de flujo general del modelo de prescripción de aclareos

3.2.7 Experimentación con el modelo

El modelo se utilizó para determinar el régimen de aclareos óptimo en rodales con calidad de sitio I, los valores de los parámetros del modelo de crecimiento y rendimiento utilizados se presentan en la Tabla 3.3. Además, se utilizaron dos valores de la densidad inicial de plantación 1111 y 1600 arb ha⁻¹.

Tabla 3.3. Parámetros del modelo de crecimiento y rendimiento

Parámetro	Descripción	Valor Calidad sitio I	Valor Calidad sitio II
AB _{pot}	Área basal potencial	37,5 m ² ha ⁻¹	32 m ² ha ⁻¹
AB _{max}	Área basal máxima	25 m ² ha ⁻¹	22 m ² ha ⁻¹
AB _{lim}	Área basal limitante	17 m ² ha ⁻¹	15 m ² ha ⁻¹
m	Parámetro de la ecuación de crecimiento en área basal de Chapman-Richards	0,05 *	0,05 *
k _a	Tasa de crecimiento antes de aclarear para una densidad inicial de 1111	0,14 *	0,14 *
k _b	Tasa de crecimiento antes de aclarear para una densidad inicial de 1600	0,19 *	0,19 *

*Valores estimados por Zambrano(1993)

Se corrió el modelo para determinar regímenes que incluyen desde uno hasta cuatro aclareos. En cada caso se hicieron 50 corridas y se seleccionó la solución que mostró el mayor valor actual neto (VAN). También se calculó el valor actual neto y el desarrollo del rodal para la alternativa de no aplicar aclareos. El modelo permite hacer estos cálculos al seleccionar un número de aclareos igual a cero; en ese caso calcula el VAN y aplica el modelo de crecimiento y rendimiento para determinar el desarrollo del rodal durante todo el turno bajo esta alternativa de manejo. No se ejecuta el Algoritmo Genético puesto que no hay necesidad de determinar la edad ni la intensidad de los aclareos. Cuando no hay raleos, el modelo utiliza una ecuación de mortalidad, específicamente la ajustada por

Quintero *et al.* (2012) a partir de datos de plantaciones de teca ubicadas en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas:

$$N_i = N_{i-1} \times e^{-0.01394} \quad [3.24]$$

donde N_i es el número de árboles en el año i .

Los costos y los precios de la madera rolliza que fueron considerados en el modelo se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5. Estos valores se basan en los trabajos de Osorio(1997) y Cruz y Guichet (2009). La tasa de interés aplicada fue del 10%.

Tabla 3.4. Costos utilizados en el modelo

Descripción	Costo	Costo	Unidades
	di=1111	di=1600	
Establecimiento año 0	612,88	882,64	\$ ha ⁻¹
Establecimiento año 1	115,64	166,54	\$ ha ⁻¹
Establecimiento año 2	58,14	83,7	\$ ha ⁻¹
Mantenimiento año 3 - turno	64,17	64,17	\$ ha ⁻¹
Corta (aclareo o aprovechamiento)	14,24	14,24	\$ m ⁻³

Tabla 3.5. Precios de la madera rolliza

Categoría diamétrica (cm)	Precio (\$ m ⁻³)
< 10	0
[10 - 15)	53
[15 - 20)	77
[20 - 24)	155
[25 - 29)	232
[30 - 39)	310
>= 40	400

3.2.8 Análisis de sensibilidad

Se estudió la sensibilidad del modelo a los cambios en las siguientes variables de entrada y parámetros: costo de corta, tasa de interés, tasa de crecimiento (parámetro k de la ecuación de Chapman-Richards), precio de la madera, área basal limitante y área basal máxima; se hicieron comparaciones con los resultados obtenidos con los valores originales de estas variables indicados en el apartado anterior. Para el análisis de sensibilidad se utilizó una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y calidad de sitio I.

- Variable costo de corta: se cambió entre ± 10 y $\pm 50\%$ del valor original utilizado (14,24 \$ m⁻³), a intervalos de 10%.
- Variable tasa de interés: se utilizaron valores del 4%, 6%, 8%, 12%, 14%.
- Precio de la madera: para estudiar el efecto de esta variable se probaron cuatro escenarios variando la relación entre los precios de la madera asignados a cada categoría diamétrica. En la Tabla 3.6 se indican los escenarios utilizados.
- Tasa de crecimiento (k): se efectuaron corridas realizando variaciones consecutivas de $\pm 1\%$ en el valor de este parámetro, teniendo cuidado de que los valores de k utilizados en el análisis no condujeran a curvas de crecimiento poco factibles en la realidad.
- Área basal limitante y área basal máxima: se amplió el intervalo entre estos dos valores, aumentando el área basal máxima y disminuyendo el área basal limitante simultáneamente en un 10% y 20%. También se redujo el intervalo entre el área basal limitante y el área basal máxima, disminuyendo el área basal máxima y aumentando el área basal limitante en un 10% y 20% simultáneamente.

Tabla 3.6. Escenarios utilizados para la variable “Precio de la madera “ en el análisis de sensibilidad del modelo

Escenario	Diámetro de la madera rolliza		
	<10	[10 - 25)	≥ 25
1	100	100	100
2	0	100	200
3	50	100	200
4	0	100	300

3.3. Resultados y Discusión

3.3.1 Régimen de aclareo óptimo

Los parámetros del Algoritmo Genético utilizado para resolver el modelo de optimización, los cuales fueron definidos mediante experimentación, se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Parámetros del Algoritmo Genético

Parámetro	Valor
Tamaño de la población	50
Probabilidad de cruzamiento	1
Probabilidad de mutación	0,01
Número máximo de iteraciones	100

Los mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo para un rodal de teca con una densidad inicial de plantación de 1111 arb ha⁻¹ y bajo las condiciones experimentales de este estudio, se presentan en la Tabla 3.8. Debido a que el número de aclareos define un problema específico de optimización, en la tabla se muestra el mejor programa de aclareo para cada escenario según el número de aclareos.

Tabla 3.8. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ (tasa de interés = 10%, costo de corta =14,24 \$ m⁻³, precios de la madera según su diámetro)

N° de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4	VAN (\$ ha ⁻¹)
0	-	-	-	-	-	-	-	-	2260,59
1	12	55,1	-	-	-	-	-	-	4585,05
2	10	36,1	17	32,8	-	-	-	-	6613,30
3	9	25,1	13	28,4	18	30,0	-	-	7362,89
4	9	25,9	16	19,9	19	10,9	22	21,9	6180,42

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

Se observa que el régimen que registra un mayor valor actual neto es el correspondiente a tres aclareos, efectuados a los 9, 13 y 18 años, con intensidades correspondientes al 25,1%, 28,4% y 30% del área basal, respectivamente. El siguiente programa de aclareo con mejor valor actual neto es aquel que incluye dos aclareos, seguido por el programa que contempla cuatro aclareos; la diferencia porcentual entre el VAN de estos dos últimos regímenes y el VAN del régimen óptimo de tres aclareos es de 11,6% menos para dos aclareos y 18,2% menos para cuatro aclareos. Los programas de manejo con un aclareo y la alternativa de no aclarear tienen un VAN mucho menor.

En la Tabla 3.9 se presentan los mejores regímenes de aclareo para teca encontrados por el modelo para una densidad inicial de plantación de 1600 arb ha⁻¹. En este escenario se tiene que la mejor solución en términos del VAN es aquella que incluye cuatro aclareos, a las edades de 6, 10, 14 y 22 años, con intensidades de 20,8%, 33,7%, 26,8% y 22,5% del área basal. Se observa además que los programas de manejo con tres y dos aclareos muestran un VAN muy cercano al registrado por el régimen de cuatro aclareos, diferenciándose por menos del 2%. Esto sugiere que los regímenes con dos y tres aclareos son otras buenas alternativas.

Tabla 3.9. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹ (tasa de interés = 10%, costo de corta =14,24 \$ m⁻³, precios de la madera según su diámetro)

N° de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4	VAN (\$/ha)
0	-	-	-	-	-	-	-	-	709,4
1	9	61,0	-	-	-	-	-	-	5386,53
2	8	37,1	16	42,7	-	-	-	-	6474,06
3	5	15,0	9	32,9	14	40,9	-	-	6549,06
4	6	20,8	10	33,7	14	26,8	22	22,5	6576,98

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

La Figura 3.6 muestra las diferencias existentes entre los distintos escenarios para las dos densidades iniciales consideradas. Dependiendo del número de aclareos, el VAN puede ser mayor o menor para una densidad inicial específica. Cuando se aplica uno o cuatro aclareos, se registran mayores beneficios económicos de un rodal con una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹, mientras que en los regímenes con dos y tres aclareos, y la alternativa de no aclarear, el mayor VAN lo presentan rodales con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹. Igualmente puede notarse que de acuerdo a las condiciones asumidas en este trabajo y bajo los supuestos del modelo, la mejor solución corresponde a un programa de manejo que incluye una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y tres aclareos.

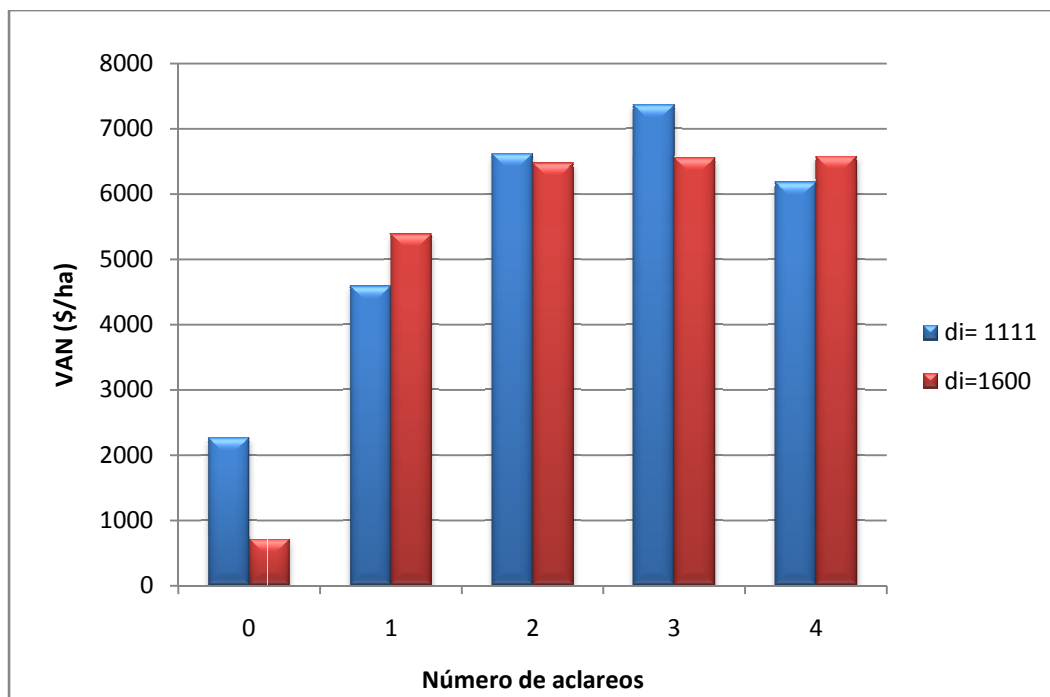


Figura 3.6. Valor actual neto (VAN) de los mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo para rodales de teca con una densidad inicial de 1111 y 1600 árboles ha⁻¹.

A partir de los resultados del modelo, es posible analizar el desarrollo del rodal bajo el régimen de aclareo generado por el Algoritmo Genético. Para ello, se elaboraron gráficos de las variables área basal, diámetro del árbol medio, volumen y densidad del rodal, en función de la edad. En las siguientes figuras se presentan estos gráficos para las dos densidades iniciales consideradas y los mejores regímenes de aclareo encontrados.

En los gráficos de área basal de la Figura 3.7 se observa el comportamiento esperado según la función de crecimiento utilizada. Para la alternativa de no aclarar, el área basal va creciendo hasta llegar a estabilizarse en la capacidad de carga del rodal. Cuando se incluyen aclareos, en los años en que estos se efectúan el área basal del rodal disminuye, luego comienza a aumentar de acuerdo a una tasa de crecimiento distinta, la cual depende de la intensidad del aclareo.

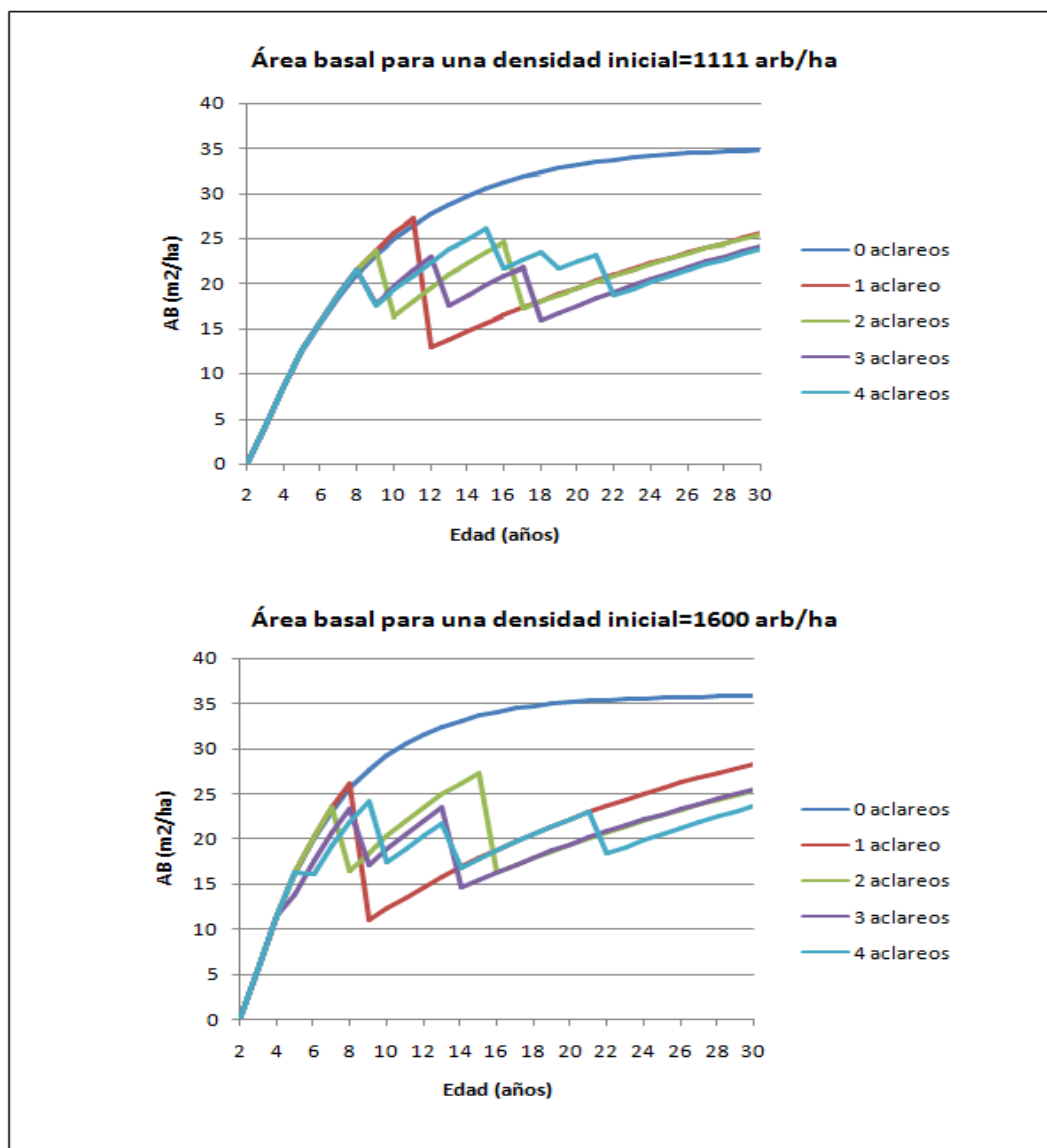


Figura 3.7. Desarrollo del área basal bajo diferentes regímenes de aclareo

En cuanto al diámetro del árbol medio, se observa en la Figura 3.8 que para los regímenes de manejo que incluyen aclareos, se logra un mayor diámetro en el turno que en la alternativa que no contempla aclareo. El mayor valor del diámetro se registra para una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y tres aclareos, alcanzándose en el turno un diámetro cercano a los 35 cm; este es el mismo régimen de manejo que registra el mayor valor actual neto.

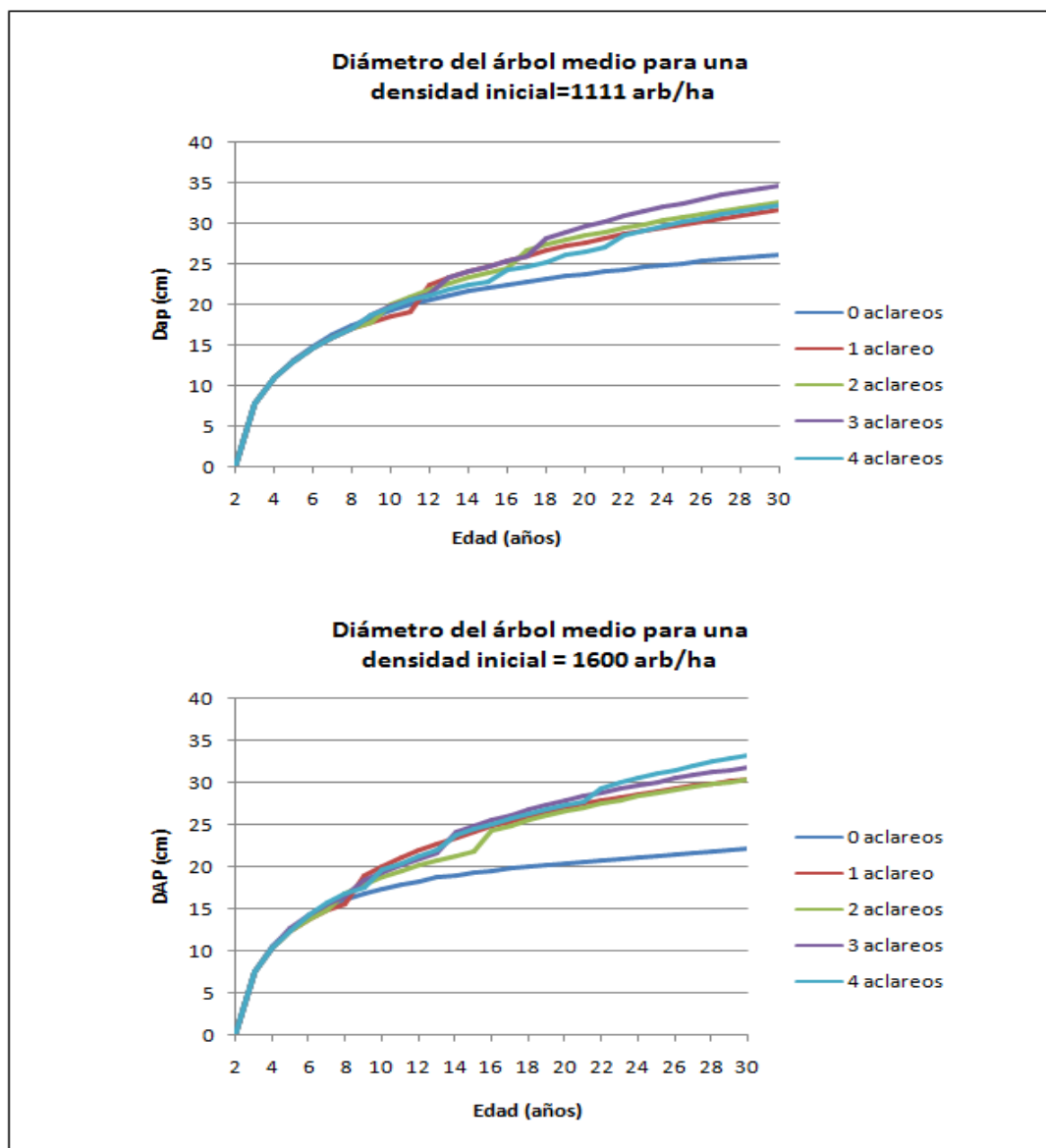


Figura 3.8. Diámetro del árbol medio bajo diferentes regímenes de aclareo

En los gráficos de la Figura 3.9 se puede ver el comportamiento de la variable volumen rollizo con corteza a lo largo del turno, en el régimen que no incluye aclareos se obtiene el volumen más alto, $272,9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para una densidad inicial de 1111 arb ha^{-1} y $267,9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para una densidad inicial de 1600 arb ha^{-1} . En los regímenes de manejo con aclareos se logra menor volumen al final del turno, pero la madera obtenida presenta diámetros más

grandes (Figura 3.8), por lo que tiene mayor valor comercial para el aserrío. Esta es la razón por la que la alternativa de no aclarar es la que presenta menos beneficios económicos en términos del VAN.

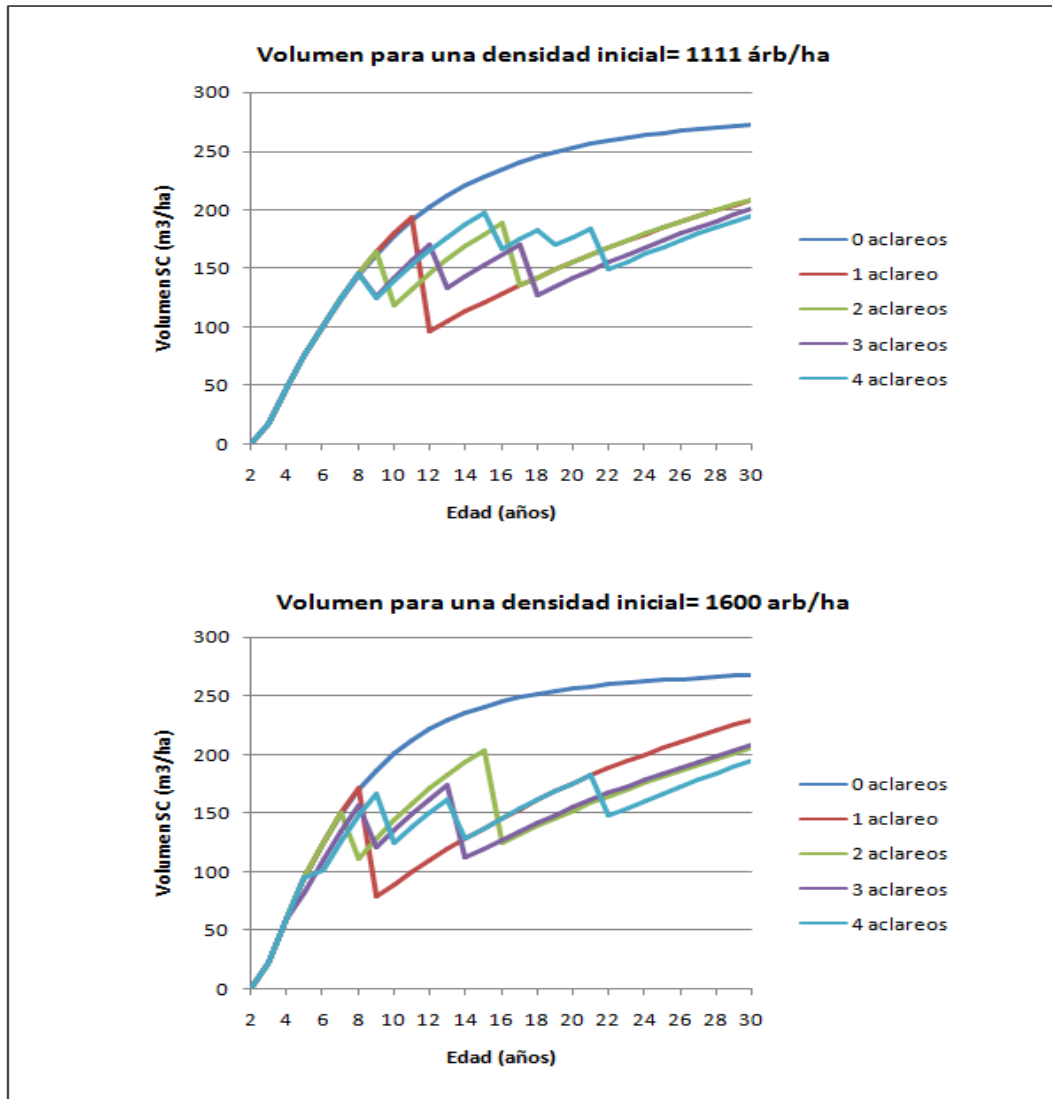


Figura 3.9. Volumen con corteza bajo diferentes regímenes de aclareo

Los cambios que se producen en la densidad del rodal durante el turno se muestran en la Figura 3.10. En el caso correspondiente a cero aclareos, la densidad va disminuyendo de acuerdo a la función de mortalidad empleada, para el momento del turno hay 648 arb ha⁻¹ si la densidad inicial es de 1111 arb ha⁻¹, y 934 arb ha⁻¹ para una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹. Para los regímenes de manejo que incorporan aclareos, la densidad al final del turno es mucho menor, estando entre 255 y 326 arb ha⁻¹ si la densidad inicial es de 1111 arb ha⁻¹, y entre 271 y 388 árboles por ha cuando la densidad inicial es de 1600 árboles arb ha⁻¹. Asimismo, en la Figura 3.10 se puede observar en cuánto disminuye el número de árboles cuando se aplican los aclareos.

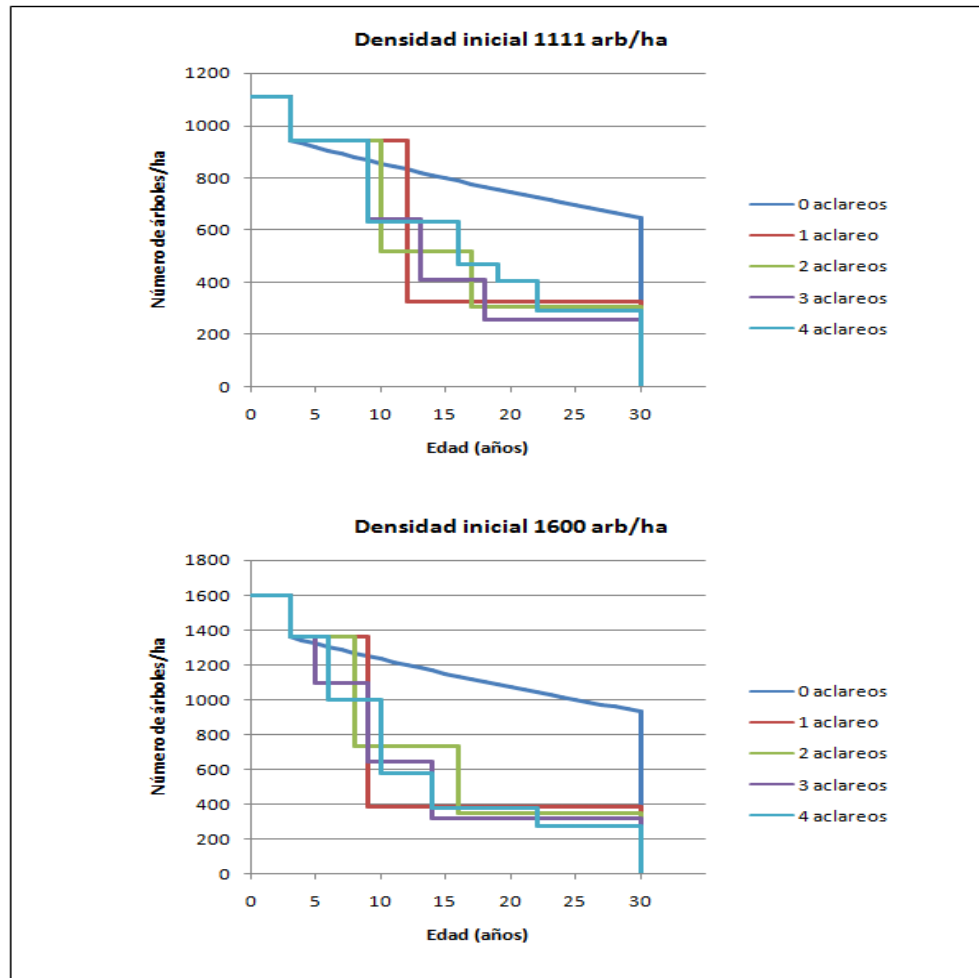


Figura 3.10. Cambios en la densidad del rodal bajo diferentes regímenes de aclareo

En la tabla de salida que genera el modelo también hay información concreta sobre las características del vuelo removido en cada aclareo y el vuelo remanente. A manera de ilustración, en la Tabla 3.10 se puede apreciar la información correspondiente al régimen de manejo que registró mayor valor actual neto, el cual corresponde a una densidad inicial igual a 1111 arb ha⁻¹ y tres aclareos.

Tabla 3.10. Variables de rodal bajo el régimen óptimo de aclareo
(densidad inicial = 1111 arb ha⁻¹ y tres aclareos)

Edad	Ab inicial	N inicial	ABaclareada	Naclareados	AB final	N final	Diámetro	Altura	Vinicial	Vaclareado	V final	Daclareado	D final	Alt aclareada	Alt final
0	0	1111	0	0	0	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1111	0	0	0	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1111	0	0	0	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	4.4	944	0	0	4.4	944	7.7	10.8	17.5	0	17.5	0	7.7	0	10.8
4	8.7	944	0	0	8.7	944	10.8	15.0	46.3	0	46.3	0	10.8	0	15.0
5	12.6	944	0	0	12.6	944	13.0	17.2	74.9	0	74.9	0	13.0	0	17.2
6	16.0	944	0	0	16.0	944	14.7	18.6	101.3	0	101.3	0	14.7	0	18.6
7	18.9	944	0	0	18.9	944	16.0	19.5	125.0	0	125.0	0	16.0	0	19.5
8	21.5	944	0	0	21.5	944	17.0	20.1	145.9	0	145.9	0	17.0	0	20.1
9	23.7	944	5.9	302	17.7	642	17.9	20.6	164.2	39.1	125.3	15.8	18.7	19.4	21.1
10	19.7	642	0	0	19.7	642	19.7	21.6	141.6	0	141.6	0	19.7	0	21.6
11	21.4	642	0	0	21.4	642	20.6	22.0	156.5	0	156.5	0	20.6	0	22.0
12	23.0	642	0	0	23.0	642	21.4	22.3	170.1	0	170.1	0	21.4	0	22.3
13	24.4	642	6.9	231	17.5	411	22.0	22.6	182.4	49.8	132.8	19.6	23.3	21.5	23.1
14	18.7	411	0	0	18.7	411	24.0	23.4	143.0	0	143.0	0	24.0	0	23.4
15	19.8	411	0	0	19.8	411	24.8	23.6	152.7	0	152.7	0	24.8	0	23.6
16	20.8	411	0	0	20.8	411	25.4	23.8	161.8	0	161.8	0	25.4	0	23.8
17	21.8	411	0	0	21.8	411	26.0	24.0	170.5	0	170.5	0	26.0	0	24.0
18	22.7	411	6.8	156	15.9	255	26.5	24.2	178.7	52.0	126.9	23.6	28.2	23.2	24.7
19	16.8	255	0	0	16.8	255	28.9	24.9	134.3	0	134.3	0	28.9	0	24.9
20	17.6	255	0	0	17.6	255	29.6	25.0	141.6	0	141.6	0	29.6	0	25.0
21	18.3	255	0	0	18.3	255	30.3	25.2	148.5	0	148.5	0	30.3	0	25.2
22	19.1	255	0	0	19.1	255	30.9	25.3	155.2	0	155.2	0	30.9	0	25.3
23	19.8	255	0	0	19.8	255	31.5	25.5	161.7	0	161.7	0	31.5	0	25.5
24	20.5	255	0	0	20.5	255	32.0	25.6	167.9	0	167.9	0	32.0	0	25.6
25	21.2	255	0	0	21.2	255	32.5	25.7	173.9	0	173.9	0	32.5	0	25.7
26	21.8	255	0	0	21.8	255	33.0	25.8	179.7	0	179.7	0	33.0	0	25.8
27	22.4	255	0	0	22.4	255	33.5	25.9	185.2	0	185.2	0	33.5	0	25.9
28	23.0	255	0	0	23.0	255	33.9	26.0	190.6	0	190.6	0	33.9	0	26.0
29	23.6	255	0	0	23.6	255	34.3	26.1	195.7	0	195.7	0	34.3	0	26.1
30	24.2	255	0	0	24.2	255	34.7	26.2	200.6	0	200.6	0	34.7	0	26.2

Es importante comparar el régimen de aclareo óptimo obtenido por el modelo bajo los supuestos y condiciones experimentales definidas en este trabajo, con los empleados en la práctica en plantaciones de *Tectona grandis* y con otros regímenes de manejo propuestos en la literatura. A pesar de que en diferentes países de Asia, África tropical, Centro y Sur América, existen plantaciones a gran escala de teca, poco es conocido acerca del espaciamiento y programa de aclareos que deberían utilizarse para maximizar la productividad. La mayoría de los estudios existentes en esta área se basan en ensayos realizados en parcelas permanentes, para áreas específicas de manejo y para algunos regímenes de aclareo puntuales.

Las actuales prácticas en el manejo de teca han sido desarrolladas a partir de lineamientos generales para el manejo de especies tropicales y adaptadas a las condiciones de crecimiento de un sitio específico por ensayo y error. En la práctica y de manera muy general, se sugiere que entre el 25% y el 50% de los árboles en pie deben ser removidos de 3 a 4 veces durante ciclos de rotación que van de 20 a 30 años y que los aclareos se determinan con base en indicadores tales como el área basal, índices de ocupación o crecimiento anual (Pérez, 2005). Los regímenes óptimos de aclareo generados por el modelo están en concordancia con estos lineamientos.

Entre los trabajos que se han llevado a cabo en Venezuela en relación a la influencia de los raleos en la productividad en plantaciones de teca, puede citarse el trabajo de Vincent *et al.* (2000), quienes presentan información comparativa sobre el rendimiento de un grupo de parcelas permanentes de teca que representan diferentes regímenes de espesura (espaciamiento y régimen de aclareo) en el Área Experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Estado Barinas. Estos autores encontraron que la masa forestal reacciona bien a aclareos fuertes en parcelas con un espaciamiento inicial 2,5 x 2,5m (1111 arb ha⁻¹), en los ensayos que reporta su investigación se aplicó un aclareo del 48,8% del área basal a los 7,8 años a una parcela con esta densidad inicial y la respuesta fue positiva. Los mencionados autores señalan que de los regímenes ensayados, el que da mejor resultado es un régimen con espaciamiento amplio, lo cual permite demorar el primer aclareo hasta

la edad de 12 a 14 años con el fin de que sea más viable la utilización comercial de los productos del aclareo. Por su parte, el modelo de optimización desarrollado en esta tesis doctoral encontró que en rodales con condiciones de crecimiento similares, cuando se aplica un aclareo, la edad óptima es a los 12 años con una intensidad del 55,1% si la densidad inicial es de 1111 arb ha⁻¹, o a los 9 años con 61% de intensidad si la densidad inicial es de 1600 arb ha⁻¹, estos regímenes no contradicen los resultados reportados por Vincent *et al.* (2000) para parcelas con un aclareo. En relación al escenario que contempla dos aclareos, estos autores no cuantificaron el efecto de un segundo aclareo, y no se hicieron ensayos con tres y cuatro aclareos, por lo que no es posible hacer comparaciones al respecto.

Algunos regímenes de aclareo para *Tectona grandis*, como los propuestos por Chaves y Chinchilla(1986), Kanninen *et al.* (2004) y Fonseca (2004) para plantaciones de Costa Rica, y otros trabajos a nivel mundial (Lowe, 1976; Dupuy y Verhaegen, 1993) recomiendan la ejecución del primer aclareo entre los 3 y 6 años, eliminando entre el 40% y 60% de los árboles, y presentan distintas opciones para las intervenciones subsiguientes, que incluyen entre dos y cinco aclareos en total. La diferencia fundamental entre estos regímenes de aclareo y los encontrados por el modelo de optimización descrito en este capítulo, es la edad en que se realizan las intervenciones. Los regímenes generados por el modelo tienden a comenzar más tarde los raleos, específicamente a los 9 años en el caso de tres y cuatro aclareos con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, y para una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹ los aclareos comienzan más temprano, a las edades de 5 y 6 años, para regímenes con tres y cuatro aclareos.

Estas diferencias se deben básicamente a los principios en los que se fundamenta el modelo, como lo son el Modelo de Área Basal y los criterios financieros utilizados para determinar el mejor régimen de manejo. Un aspecto clave en la determinación de la edad de los aclareos en el modelo, es el cumplimiento de las restricciones de área basal, el modelo busca mantener esta variable entre los valores del área basal limitante y el área basal máxima, por esta razón no se realizan aclareos durante los primeros años, ya que de

acuerdo al modelo de crecimiento utilizado, antes del año 7 no se ha alcanzado el área basal limitante. Adicionalmente, el modelo busca obtener beneficios económicos de los productos de los aclareos, cuando estos se practican a edades muy tempranas la madera extraída es de poco valor, por lo que el modelo hace un balance entre los costos y los beneficios que trae consigo un aclareo y selecciona las opciones que incrementan el valor actual neto.

Otro criterio utilizado para proponer un sistema de aclareo citado en la literatura, es dejar que la plantación alcance 20-25 m²ha⁻¹ de área basal y cortar hasta dejar 14-17m²ha⁻¹ (Fonseca, 2004; Torres, 1982). Los regímenes generados por el modelo de optimización cumplen en su gran mayoría con este criterio, tal como puede observarse en la Figura 3.7.

De acuerdo a lo anterior, puede decirse que la metodología utilizada en este trabajo para prescribir regímenes de aclareo para teca, produce resultados razonables dentro de las restricciones y supuestos establecidos. No obstante, el modelo es susceptible a mejoras, tal como la utilización de un modelo de simulación de crecimiento y rendimiento más refinado, que incluya otros aspectos de la dinámica de la plantación (ej. índice de sitio, altura mayor, nutrientes, componentes de biomasa, cierre de copa, entre otros). Igualmente, algunas condiciones o supuestos del modelo pueden ser modificados según las características de la plantación en estudio. Así por ejemplo, en el siguiente capítulo se corre el modelo sin incluir las restricciones de área basal e incorporando el secuestro de carbono como objetivo del manejo.

3.3.2 Análisis de sensibilidad del modelo

Variable “costo de corta”

Al cambiar los valores del costo de corta en el rango de variación indicado se observó que los resultados del modelo se mantienen iguales. En todos los casos, los regímenes de

aclareo óptimos siguen siendo los mismos y la mejor solución corresponde al régimen que contempla tres aclareos (Tabla 3.8).

Variable “tasa de interés”

Las variaciones en la tasa de interés producen cambios en la solución óptima en algunos escenarios. En la Tabla 3.11 se presenta un resumen de los resultados.

Tabla 3.11. Análisis de sensibilidad del modelo para la variable “tasa de interés”

i * (%)	Mejor solución global	Cambios en la solución óptima con respecto a la solución obtenida con i=10%, de acuerdo a los escenarios de optimización			
		1 aclareo	2 aclareos	3 aclareos	4 aclareos
4	3 aclareos	C	NC	NC	NC
6	3 aclareos	C	NC	NC	NC
8	3 aclareos	NC	NC	NC	NC
12	3 o 4 aclareos	NC	NC	NC	C
14	3 o 4 aclareos	NC	NC	NC	C

*Tasa de interés

C: cambia el mejor régimen de aclareo, la edad y/o intensidad de los raleos es diferente a la solución óptima.
NC: el mejor régimen de aclareo no cambia ante las modificaciones en la tasa de interés.

Se puede observar en la columna “Mejor solución global” que cuando la tasa de interés es 4%, 6% y 8% la solución óptima se mantiene igual, es decir, el mejor régimen es el de tres aclareos. Para tasas de interés del 12% y 14% la diferencia en el VAN entre los escenarios que incluyen tres y cuatro aclareos es pequeña, en ambos casos menor al 1%, por lo cual la mejor solución puede ser un régimen con tres o cuatro aclareos, en ese caso el planificador forestal puede elegir el que considere más conveniente.

Al analizar los diferentes escenarios de aclareo en forma independiente (por número de aclareos), se tiene que para tasas de interés del 4% y 6%, en el escenario de un aclareo la mejor solución varía, siendo diferente el año en que se realiza el aclareo y la intensidad del mismo con respecto al régimen de aclareo para una tasa del 10%. Por otra parte, para valores de la tasa de interés del 12 y 14%, la solución óptima en el escenario de cuatro

aclareos cambia con respecto a la obtenida con la tasa de interés utilizada originalmente (10%). En los demás escenarios la solución óptima no se ve afectada ante cambios en la tasa de interés.

De acuerdo a lo anterior, puede decirse que el modelo es sensible a variaciones en la tasa de interés en algunos escenarios de optimización relacionados al número de aclareos. La solución óptima se puede alterar cuando se considera solo un aclareo y disminuye la tasa de interés, y en el escenario que contempla cuatro aclareos, cuando la tasa de interés aumenta.

Variable "Precio de la madera"

Cuando cambia la relación entre los precios de la madera rolliza para las diferentes categorías diamétricas, la solución óptima se modifica en los distintos escenarios considerados (Tabla 3.6), siendo el modelo sensible a estas variaciones. Si se asigna el mismo precio a todos los productos (escenario 1), los mejores regímenes encontrados por el modelo tienen edades e intensidades de aclareo diferentes a los regímenes óptimos obtenidos con los datos originales, un patrón que se observa en todos los casos (1, 2, 3 y 4 aclareos) es que la intensidad del primer aclareo es mayor. En los escenarios 2 y 4, al aumentar la diferencia de precios entre la madera que se ubica en la categoría diamétrica [10 - 25) cm, y la madera con diámetro superior a 25 cm, se observa que los regímenes óptimos también se modifican, en la mayoría de los casos los aclareos se prescriben a edades más tempranas. Por otra parte, si únicamente se varía el precio de la madera con diámetro inferior a 10 cm (escenario 3) las soluciones óptimas no cambian; de acuerdo los supuestos del modelo el primer aclareo puede realizarse a partir del año 5, y según el modelo de crecimiento y rendimiento utilizado, a esta edad el diámetro del árbol medio ya ha superado los 10 cm, por esta razón no se aprovecha madera con un diámetro inferior y el precio de estos productos no es relevante al determinar la solución óptima.

En cuanto a la mejor solución global, esta sigue siendo el régimen que contempla tres aclareos, excepto en el escenario 4, acá el mejor régimen es el de dos aclareos.

Parámetro “tasa de crecimiento k ”

El modelo es muy sensible a variaciones en la tasa de crecimiento (parámetro k de la ecuación de Chapman-Richards de crecimiento en área basal), si su valor cambia en al menos 1% los regímenes de aclareo óptimos se modifican. Al aumentar el valor de k (en la práctica la tasa de crecimiento puede incrementarse si se emplean otros tratamientos silviculturales como fertilización o irrigación), el modelo prescribe los aclareos a edades más tempranas. Estos resultados tienen sentido, ya que cuando un rodal crece más rápido, se hace necesario efectuar aclareos tempranos para evitar los efectos de la competencia. Lo contrario ocurre cuando la tasa de crecimiento disminuye, por lo general la edad en que se realizan los aclareos es mayor, ya que el rodal tarda más en alcanzar el área basal máxima.

En lo que se refiere al mejor escenario de optimización, a pesar de los cambios que se originan en las edades e intensidades de los aclareos al modificar el valor de k , el mejor régimen continua siendo el programa con tres aclareos, excepto cuando la tasa de crecimiento se incrementa en un 7% o más, en ese caso el régimen con cuatro aclareos es el que registra mayor valor actual neto y por consiguiente es el óptimo.

Parámetros “área basal limitante y área basal máxima”

Al modificar la longitud del intervalo entre estas dos variables, el cual define el período para el cual el crecimiento en área basal es máximo, se observó que el modelo es muy sensible a estos parámetros. En todos los escenarios de optimización la solución óptima se altera cuando se cambian los valores del área basal limitante y el área basal máxima.

Se observa que la condición que prevalece en el modelo para seleccionar el régimen de aclareo óptimo son las restricciones de área basal, el algoritmo de optimización maximiza los beneficios pero busca siempre satisfacer las restricciones impuestas, por esta razón el modelo es más sensible a variaciones en los parámetros del modelo de crecimiento y del Modelo de Área Basal.

3.4. Conclusiones

El modelo de optimización presentado en este capítulo permite definir esquemas de aclareo para plantaciones de *Tectona grandis* L.f. (teca), teniendo como objetivo la maximización del valor actual neto del flujo de caja relacionado a las cortas (intermedias y final). Este es un enfoque diferente al que tradicionalmente se ha utilizado para proponer regímenes de manejo para teca.

El modelo genera información completa relacionada al régimen de aclareos óptimo que puede ser de gran ayuda para los profesionales forestales responsables de planificar el manejo de plantaciones. Esta información incluye edad e intensidad de los aclareos, variables de rodal como área basal, diámetro del árbol medio, altura, densidad, volumen, tanto del vuelo aclareado como del vuelo principal, para cada año del turno. Además, es posible obtener regímenes de aclareo para diferentes escenarios relacionados con los costos de corta, precio de la madera, tasa de interés, calidad de sitio y densidad inicial.

Diferentes variables pueden afectar la optimización e influir en el régimen de aclareo que el modelo genera. A través del análisis de sensibilidad se determinó que el modelo es muy sensible a los parámetros tasa de crecimiento, área basal limitante, área basal máxima, y al precio de la madera, es moderadamente sensible a la tasa de interés, y no es sensible a cambios en los costos de corta. De esta manera, para utilizar modelo de prescripción de aclareos y obtener resultados confiables se debe tener mucho cuidado al momento de estimar los parámetros y variables más sensibles del modelo.

El Algoritmo Genético diseñado para resolver el modelo funcionó correctamente, ya que permitió integrar el módulo de crecimiento con el algoritmo de optimización, obteniendo la solución del modelo en fracciones de segundo sin importar su complejidad. A pesar de ser una técnica muy robusta, fácil de implementar y utilizada ampliamente en distintas áreas, no se encuentran en la literatura trabajos donde se haya utilizado para resolver de modelos a nivel de rodal. Por esta razón, en investigaciones futuras se recomienda comparar su desempeño con técnicas de solución como el método Hooke y Jeeves,

heurísticas como Recocido Simulado y Búsqueda Tabú u otros métodos de búsqueda basados en poblaciones (Pukkala, 2009).

El modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareos puede trabajar como herramienta de apoyo en la toma de decisiones referentes al manejo de teca, puesto que indica posibles caminos a seguir con sus consecuencias en el desarrollo del rodal y en los beneficios que pueden obtenerse de éste. Aunque fue desarrollado bajo unos supuestos específicos, puede ser fácilmente reprogramado para adaptarlo a otras condiciones e incluso a otras especies forestales. Así por ejemplo, en el capítulo siguiente el modelo se modifica para incluir el secuestro de carbono como un objetivo adicional a la producción de madera con fines industriales, en trabajos posteriores podrían considerarse otros bienes y servicios de los bosques. Adicionalmente, los regímenes de aclareo que el modelo es capaz de encontrar permiten definir un conjunto de alternativas de manejo entre las cuales un modelo de planificación para múltiples rodales puede elegir, tal como se hace en el capítulo V, o que un profesional forestal puede evaluar de acuerdo a su experiencia y a la factibilidad práctica.

3.5 Referencias

- Adams DM, Ek AR (1974) Optimizing the management of uneven-aged forest stands. *Canadian Journal of Forest Research* 4: 274-287.
- Amidon EL, Akin GS (1968) Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *Forest Science* 14: 287-291.
- Arthaud GJ, Klemperer WD(1988) Optimizing high and low thinning in loblolly pine with dynamic programming. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 1118-1122.
- Baskent EK, Keles S, Yolasigmaz HA (2008) Comparing multipurpose forest management with timber management, incorporating timber, carbon and oxygen values: A case study. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 105-120.
- Bettinger P, Boston K, Siry JP, Grebner DL (2009) *Forest Management and Planning*. Academic Press, Elseiver. San Diego, EEUU. 331 pp.

- Bettinger P, Graetz D, Sessions J (2005) A density-dependent stand-level optimization approach for deriving management prescriptions for interior northwest (USA) landscapes. *Forest Ecology and Management* 217: 171-186.
- Brodie JD, Adams D, Kao C (1978) Analysis of economic impacts on thinning and rotation for Douglas-fir, using dynamic programming. *Forest Science* 24: 513-522.
- Brukas V, Brodie JD (1999) Economic optimization of silvicultural regimes for Scots pine using dynamic programming. *Baltic Forestry* 5: 28-34.
- Bullard SH, Sherali HD, Klemperer WD (1985) Estimating optimal thinning and rotation for mixed-species timber stands using a random search algorithm. *Forest Science* 31:303-315.
- Chaves E (2003) *Aclareos en Plantaciones Forestales*. Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. [documento en línea]. Disponible desde Internet en: www.una.ac.cr/inis/docs/refor/chaves.pdf [con acceso el 17-02-12].
- Chaves E, Chinchilla O (1986) Ensayos de aclareo en plantaciones de *Tectona grandis* L. f en Cóbano de Puntarenas, Costa Rica. *Ciencias Ambientales* 7:65-74.
- Chen BW, Gadow vK (2008) Combining spatial and other objectives in forest design. *Forestry Studies* 48: 30-40.
- Cruz N, Guichet. 2009. *Análisis Financiero para Tectona grandis en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Turrialba, Costa Rica. 18 pp.
- Davis LS, Johnson N, Bettinger P, Howard T (2001) *Forest management: to sustain ecological, economic, and social values*. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 804 pp.
- Dréo J, Pétrowski A, Siarry P, Taillard E (2006) *Metaheuristics for hard Optimization*. Springer - Verlag. Berlín, Alemania. 369 pp.
- Dupuy B, Verhaegen, D (1993) Le teck de plantation (*Tectona grandis*) en Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques*, 235: 9-24.
- Fonseca 2004. *Manual de productores de teca (Tectona grandis L. f) en Costa Rica*. Heredia, Costa Rica. [documento en línea]. Disponible desde Internet en:

ww.fonafifo.com/text_files/proyectos/ManualProductoresTeca.pdf [con acceso el 25-03-2012].

Gove JH, Fairweather SE (1992) Optimizing the management of uneven-aged forest stands: a stochastic approach. *Forest Science* 38: 623-640.

Hille M, Hessenmöller D, Möhring B, Gadow Kv (1999) Evaluating alternative silvicultural regimes in a 110-year old beech forest. Provisional Proceedings "From Theory to Practice - Gaps and Solutions in Managerial Economics and Accountings in Forestry". Praga, República Checa. pp 94-100.

Hooke R, Jeeves TA (1961) "Direct Search" solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM* 8(2): 212 - 219.

Hyytiäinen K, Tahvonen O (2002) Economics of forest thinnings and rotation periods for Finnish conifer cultures. *Scandinavian Journal or Forest Research* 17: 274-288.

Hyytiäinen K, Tahvonen O y Valsta L (2004) Optimum juvenile density, harvesting, and stand structure in even-aged Scots pine stands. *Forest Science* 51: 120-133.

Kanninen M, Perez LD, Montero M, Viquez E (2004) Intensity and timing of the first thinning of plantations in Costa Rica: results of a thinning trial. *Forest Ecology and Management* 203: 88-99.

Kao C, Brodie JD (1979) Determination of optimal thinning entry interval using dynamic programming. *Forest Science* 25: 672-674.

Kao C, Brodie JD (1980) Simultaneous optimization of thinning and rotation with continuous stocking and entry intervals. *Forest Science* 26: 338-346.

Lowe, RG (1976) Teak (*Tectona grandis* Linn f) thinning experiment in Nigeria. *Commonwealth Forestry Review* 55(3):189-202.

Microsoft Corporation (2010) *Definir y resolver un problema con Solver* [documento en línea]. Disponible desde Internet en:

<<http://office.microsoft.com/es-es/excel-help/definir-y-resolver-un-problema-con-solver-HP010342416.aspx?CTT=5&origin=HP010342660>> [con acceso el 10-06-2010].

Microsoft Corporation (2012) *Microsoft Visual Studio 2010*. [documento en línea]. Disponible desde Internet en:

<<http://msdn.microsoft.com/query/dev10.query?appId=Dev10IDEF1&l=ES-ES&k=k%28MSDNSTART%29&rd=true>> [con acceso el 8-01-2012].

- Moret AY, Jerez M, Mora A (1998) Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas – Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.
- Osorio O. 1997. *Regímenes de espesura y sus efectos en la rentabilidad de teca (Tectona grandis L.f) en Caparo, Venezuela*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 98 pp.
- Palahí, M, Pukkala T (2003) Optimising the management of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Spain based on individual-tree models. *Annals of Forest Science* 60: 105-114.
- Paredes G, Brodie JD (1987) Efficient specification and solution of even-aged rotation and thinning problem. *Forest Science* 33: 14-29.
- Pérez LD (2005) *Stand growth scenarios for Tectona grandis plantations in Costa Rica*. Academic dissertation. University of Helsinki. 77 pp.
- Pienaar LV, Turnbull KJ (1973) The Chapman-Richards Generalization of Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Science* 19: 2-22.
- Pukkala T (2009) Population-based methods in the optimization of stand management. *Silva Fennica* 43(2): 261-274.
- Pukkala T, Miina J (1997) A method for stochastic multiobjective optimization of stand management. *Forest Ecology and Management* 98: 189-203
- Pukkala T, Miina J (2005) Optimising the management of a heterogeneous stand. *Silva Fennica* 39(4):525-538.
- Quintero MA, Jerez M, Flores J (2012) Modelo de crecimiento y rendimiento para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) usando el enfoque de espacio de estados. *Revista Ciencia e Ingeniería* 33(1): 33-42.

- Roise JO (1986) A nonlinear programming approach to stand optimization. *Forest Science* 32: 735-748.
- Seo JH, Vilčko F, Sánchez S, Kunth S, Son YM, Von Gadow K (2005) A case study of forest management planning using a new heuristic algorithm. *Tree Physiology* 25: 929 – 938.
- Taha HA (2004) *Investigación de Operaciones*. Séptima edición. Prentice Hall, México. 830 pp.
- Torres LA (1982) *Influencia del sitio y la espesura en el crecimiento en plantaciones de teca (Tectona grandis) en Caparo, Venezuela*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Mérida, Venezuela. 67 pp.
- Valsta LT (1990) A comparison of numerical methods for optimizing even aged stand management. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 961-966.
- Vincent L (1980) *Manejo de plantaciones con fines de producción*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 151 pp.
- Vincent L (1985) *El modelo de área basal en la formulación del régimen de espesura en plantaciones de teca en Caparo, Edo Barinas, Venezuela*. III Seminario sobre plantaciones forestales, Maturín. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 16 pp.
- Vincent L (1989) *El raleo en plantaciones jóvenes de teca en la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela*. Proyecto CC2-7. Comodato ULA-MARNR. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Mérida, Venezuela.
- Vincent L, Moret AY, Jerez M (2000) Comparación de algunos regímenes de espesura en plantaciones de teca en el área experimental de la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 44(2): 87-95.
- Wadsworth FH (2000) *Producción Forestal para América Tropical*. Manual de Agricultura 710. USDA Departamento de Agricultura de los EEUU, Servicio Forestal. 603 pp.

- Wikström P (2001) Effect of decision variable definition and data aggregation on a search process applied to a single-tree simulator. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 1057-1066.
- Wikström P, Eriksson LO (2000) Solving the stand management problema under biodiversity-related considerations. *Forest Ecology and Management* 126:361-376.
- Yoshimoto A, Haight R, Brodie JD (1990) A comparison of the pattern search algorithm and the modified PATH algorithm for optimizing an individual tree model. *Forest Science* 36: 394-412.
- Zambrano T (1993) *Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (Tectona grandis Linn)*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 147pp.
- Zambrano T, Jerez M, Vincent L (1995) Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (*Tectona grandis* L.) *Revista Forestal Venezolana* 39 (1): 40-48.
- Zambrano T, Suárez M, Jerez M. 2001. Evaluación de la efectividad del ajuste de algunos modelos de regresión utilizados para estimar la relación altura-diámetro en parcelas permanentes de rendimiento y aclareo en teca (*Tectona grandis* Linn). *Revista Forestal Venezolana* 45(2): 163-173.

CAPITULO IV

MODELO DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA PARA PRESCRIBIR REGÍMENES DE ACLAREO CON CONSIDERACIONES SOBRE SECUESTRO DE CARBONO

4.1 Introducción

El crecimiento acelerado de las emisiones de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso, dióxido de carbono, halocarbonos) ha sido un tema de interés y preocupación en las últimas décadas debido a su influencia en el calentamiento global, uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad. Desde la revolución industrial, la concentración de estos gases en la atmósfera se ha venido incrementando considerablemente, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), la deforestación, los cambios en los usos de la tierra, los procesos industriales y otras actividades humanas. Se estima que el nivel de los gases de efecto invernadero en la atmósfera aumentó en un 30% durante el siglo XX, originando un incremento en la temperatura promedio global de 0,6°C (IPCC, 2000); además es probable que la temperatura promedio mundial aumente entre 1,1°C y 6,4°C durante el siglo XXI por esta misma causa, lo que afectaría de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (IPCC, 2007).

El gas de efecto invernadero más importante es el dióxido de carbono (CO₂), el cual contabiliza el 77% de las emisiones (Backéus, 2009). Por esta razón, se han planteado diferentes alternativas a nivel internacional para mitigar estas emisiones, entre las que se destaca el mantenimiento y creación de ecosistemas forestales por tener gran potencial para secuestrar y almacenar cantidades importantes de carbono.

La producción forestal influye en dos procesos del ciclo de carbono: fijación y emisión (Hoen y Solberg, 1994). La fijación ocurre cuando las plantas a través de la fotosíntesis, remueven CO₂ de la atmósfera y lo utilizan para la elaboración de azúcares y otros compuestos orgánicos, necesarios para formar las estructuras del árbol (raíces, tronco,

ramas y follaje). Las plantas leñosas de larga vida almacenan carbono en la madera y otros tejidos hasta que mueren y se descomponen (Franquis e Infante, 2003). En las plantaciones forestales industriales, los troncos al ir incrementando su diámetro y su altura, alcanzan un tamaño tal que pueden ser aprovechados con fines comerciales para la obtención de distintos productos, en los cuales siguen almacenadas ciertas cantidades de carbono hasta que termina su vida útil. Por su parte, las emisiones de carbono en una plantación forestal ocurren de varias maneras, una de ellas es producto de la descomposición de la biomasa de los árboles (hojarasca, ramas y troncos caídos) debido a mortalidad natural, o como consecuencia del aprovechamiento (desechos de las cosechas). Estos componentes al degradarse, liberan carbono a la atmósfera como CO₂, monóxido de carbono (CO) o metano (CH₄), o pueden ser incorporados al suelo para dar origen al humus estable que, a su vez, aporta nuevamente CO₂ al entorno (Ordoñez y Masera, 2001; Franquis e Infante, 2003). Lo mismo sucede con los productos forestales obtenidos de la madera cosechada, al finalizar su tiempo de vida se degradan, aportando carbono al suelo y CO₂ producto de su descomposición a la atmósfera. También mediante el proceso biológico de la respiración los árboles emiten CO₂. Durante el tiempo que el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol o en productos forestales, y hasta que es emitido nuevamente a la atmósfera, se considera que se encuentra almacenado. En el momento de liberación, ya sea por la descomposición de materia orgánica, degradación de los productos forestales o la quema de la biomasa, el carbono vuelve a la atmósfera para continuar el ciclo (Ordoñez y Masera, 2001). En la Figura 4.1 se puede observar un diagrama simplificado de los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal.

Los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre, por ello se consideran un medio efectivo y seguro para ayudar a reducir los niveles de CO₂ en la atmósfera (Brown *et al.*, 1993; Dixon *et al.*, 1993). Para compensar las crecientes emisiones de CO₂, los ecosistemas forestales pueden ser manejados de varias maneras: aumentando las reservas de carbono al crear nuevos sumideros o ampliar los existentes; conservar los bosques y los suelos naturales que almacenan carbono, evitando

la deforestación; e incrementando el uso de la madera en sustitución de otros materiales, empleándose en la fabricación de productos duraderos o como biocombustible en reemplazo de combustibles fósiles (Montoya, 1995).

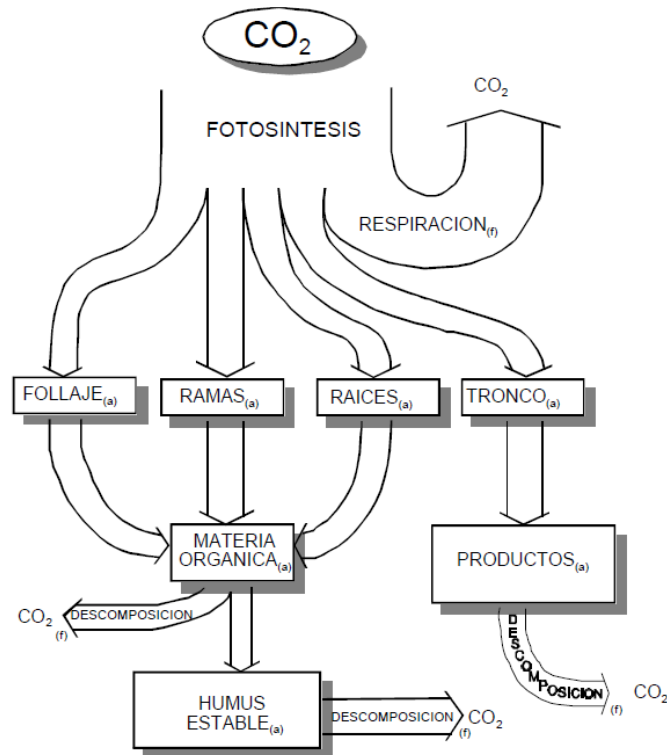


Figura 4.1. Flujos (f) y almacenes (a) de carbono en un ecosistema forestal.

Fuente: Ordoñez y Masera (2001).

El secuestro de carbono puede llegar a ser uno de los mayores servicios ambientales que un bosque, ya sea natural o una plantación, es capaz de proveer (Pohjola y Valsta, 2007). En este sentido, las plantaciones forestales con fines de producción de madera juegan un papel preponderante, ya que son un medio de captura de carbono desde que comienzan a crecer los árboles hasta su aprovechamiento, y después de este, gran parte del carbono capturado se mantiene almacenado por un período de tiempo en los productos obtenidos. Ante esta situación, los planificadores forestales se enfrentan a la tarea de optimizar

conjuntamente la producción de madera y el secuestro de carbono (Lopera y Gutiérrez, 2001).

Las plantaciones forestales comerciales son generalmente sometidas a diferentes regímenes de manejo de acuerdo a los intereses económicos de las empresas dedicadas a esta labor. Si se desea incorporar el secuestro de carbono como un objetivo adicional de la plantación, se hace necesario conocer no solo el efecto de las diferentes estrategias de manejo en la producción maderera sino también su influencia en el comportamiento del carbono en el bosque. Diversas investigaciones demuestran que el manejo forestal puede afectar la capacidad de los bosques para secuestrar carbono, y se han sugerido medidas para favorecer el secuestro de carbono mientras se produce madera, tales como alargar el turno (Liski *et al.*, 2001; Pussinen *et al.*, 2002; Kaipainen *et al.*, 2004), cambiar de un sistema de corta total a un aprovechamiento selectivo (Read *et al.*, 2001) y mejorar las técnicas silviculturales tales como fertilización (Mäkipää *et al.*, 1998) y las prácticas de aclareo (Hoen y Solberg, 1994; Karjalainen, 1996; Thornley y Cannell, 2000; Pohjola y Valsta, 2007).

En este capítulo se propone un modelo de optimización a nivel de rodal para determinar un plan óptimo de aclareos que maximice los beneficios económicos asociados al aprovechamiento de la madera y al secuestro de carbono en plantaciones de *Tectona grandis* L.f. La investigación tiene como objetivos definir regímenes de aclareos óptimos para rodales de teca (número de aclareos, edad e intensidad de los mismos) que consideren el secuestro de carbono como otro producto de la plantación, y cuantificar la influencia que tendría la venta de este servicio sobre el flujo de caja asociado a un turno. El modelo incluye los siguientes componentes del flujo de carbono en la plantación: el carbono fijado debido al crecimiento en biomasa (aérea y subterránea) y las emisiones de carbono debido a la descomposición de ramas, tocones, madera muerta, y a la desintegración de los productos forestales obtenidos en la cosecha. Como salida, proporciona información sobre volumen y diámetros aprovechados, área basal, densidad, valor actual neto del flujo de caja relacionado a las cortas intermedias y a la corta final, y

flujo de carbono asociado al régimen óptimo de aclareo. El modelo de optimización se apoya en un modelo de crecimiento y rendimiento, desarrollado para teca con datos provenientes de parcelas permanentes establecidas en las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo, estado Barinas, el cual permite estimar el desarrollo del rodal en función de los regímenes de aclareo generados por el modelo. Además, para determinar la cantidad de carbono que fijan las plantaciones forestales es importante contar con información sobre el crecimiento anual de la plantación, el volumen por unidad de área y la proporción de carbono en la biomasa seca de las especies, este último dato fue obtenido a partir de estudios disponibles en la literatura (Kraenzel *et al.*, 2003). Debido a la inclusión de ecuaciones no lineales, al uso de variables enteras y reales para representar la edad y la intensidad de los aclareos, y a la multiplicidad de factores considerados, se usó una heurística para resolver el modelo. La técnica de solución fue Algoritmos Genéticos, la cual previamente había sido utilizada en el modelo de aclareos presentado en el capítulo III, mostrando un buen desempeño.

El modelo desarrollado permite analizar el comportamiento del flujo de carbono y su interacción con la producción de madera en plantaciones de *Tectona grandis* L.f. bajo diferentes regímenes de aclareo, mediante un enfoque que hasta ahora no se ha utilizado en Venezuela en el manejo de plantaciones forestales. Los resultados proporcionan una idea general acerca del potencial de las plantaciones como sumideros de carbono y del valor agregado que el secuestro de carbono puede representar para las empresas del sector forestal.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Estructura y funcionamiento del modelo

Se propone un modelo de optimización para rodales coetáneos de *Tectona grandis* L.f. (teca) que encuentra regímenes de aclareo que maximizan los beneficios económicos obtenidos debido a la producción de madera y al servicio ambiental de secuestro de

carbono. El modelo determina la edad e intensidad en que deben aplicarse los aclareos, mientras que el número de aclareos realizados durante el turno se considera un dato de entrada definido por el usuario, el cual puede variar de uno a cuatro aclareos. El modelo consta de tres módulos:

1. Módulo de crecimiento y rendimiento: incluye un modelo que simula el crecimiento en plantaciones de teca y permite calcular variables de rodal como área basal, densidad, diámetro promedio, volumen y altura, bajo diferentes regímenes de aclareo y para cada año del turno. Se utiliza la ecuación de crecimiento en área basal de Chapman-Richards ajustada por Zambrano (1993); la relación altura total y diámetro a la altura de pecho desarrollada por Zambrano *et al.* (2001); y en la estimación del volumen sin corteza y con corteza se emplea el modelo logarítmico de variable combinada propuesto por Moret *et al.* (1998). Las fórmulas de cálculo que conforman el módulo de crecimiento y rendimiento son las mismas que se emplearon en el modelo de prescripción de aclareos descrito en el capítulo III (ecuaciones 3.1 a 3.10).

2. Módulo carbono: se encarga de realizar todos los cálculos referentes a la captura y a las emisiones de carbono en el rodal, considerando un régimen de aclareo determinado. La incorporación del secuestro de carbono en un modelo de planificación forestal se puede hacer en diferentes escalas, incluyendo un número importante de componentes del ciclo de carbono o pocos componentes (Backéus *et al.*, 2005). El modelo desarrollado considera los siguientes componentes del flujo de carbono en la plantación:

- a) Fijación: se estima el carbono fijado debido al crecimiento en biomasa, tanto aérea como subterránea.
- b) Emisiones: se calculan las emisiones ocurridas por la descomposición de ramas, tocones y fustes, madera muerta, y las que se originan por la descomposición de los productos forestales obtenidos de la cosecha.

En el modelo se calcula el secuestro neto de carbono como la diferencia entre el carbono secuestrado por la biomasa y el carbono emitido a la atmósfera. Para estimar la biomasa

del fuste se utilizan los datos de volumen que son calculados para cada año del turno por el módulo de crecimiento y rendimiento y se aplica un factor de conversión volumen - biomasa seca. Además, se utiliza un factor de expansión de biomasa para determinar la biomasa aérea total (fuste, hojas y ramas) en función de la biomasa del fuste. También se aplica un factor denominado relación raíz-vástago, que permite calcular la biomasa subterránea a partir de la biomasa aérea, según las indicaciones del IPCC (2005). A partir de la biomasa total (aérea + subterránea) se estima el carbono secuestrado, el cual corresponde a un porcentaje de la biomasa seca que oscila entre 45% y 50%, dependiendo de la especie (Bridsey, 1992). Para teca Kraenzel *et al.* (2003) determinaron que este porcentaje es en promedio igual a 49,5%. En la Figura 4.2 se resume el procedimiento usado para estimar el carbono almacenado en los árboles de la plantación para un año cualquiera del período de planificación. En cuanto a las emisiones de carbono, estas se calculan en cada año del turno y para cierto período de tiempo posterior al aprovechamiento final, ya que los productos obtenidos y los desechos de la cosecha mientras se descomponen, van liberando carbono a la atmósfera durante varios años, de acuerdo al tiempo de vida y la tasa de descomposición asociados a cada tipo de producto. Las ecuaciones de cálculo se especifican en la sección que corresponde al modelo matemático. No se incluyen estimaciones referentes a carbono fijado en el suelo de la plantación, emisiones producidas en las operaciones de cosecha y en el transporte de los productos forestales, posible reciclaje de los productos, el cual retarda las emisiones de carbono debidas al uso de los productos forestales, ni el efecto de sustitución de combustibles fósiles por madera.

3. Módulo de optimización: determina el esquema de aclareos que maximiza los beneficios económicos obtenidos del rodal, en términos del valor actual neto (VAN) del flujo de caja relacionado a la producción de madera y secuestro de carbono. Para determinar los beneficios económicos del secuestro de carbono, se asumió un pago por este servicio ambiental, siguiendo el enfoque utilizado por Backéus *et al.* (2005), Díaz-Balteiro y Rodríguez (2006), y Baskent *et al.* (2008), según el cual si el balance de carbono en el rodal en un año determinado es positivo, se reciben ingresos de acuerdo al

precio del carbono considerado, mientras que un flujo de carbono negativo se penaliza usando el mismo valor del precio de carbono. El balance de carbono es positivo cuando el carbono secuestrado por la biomasa es mayor a las emisiones producidas, en caso contrario el balance de carbono es negativo.

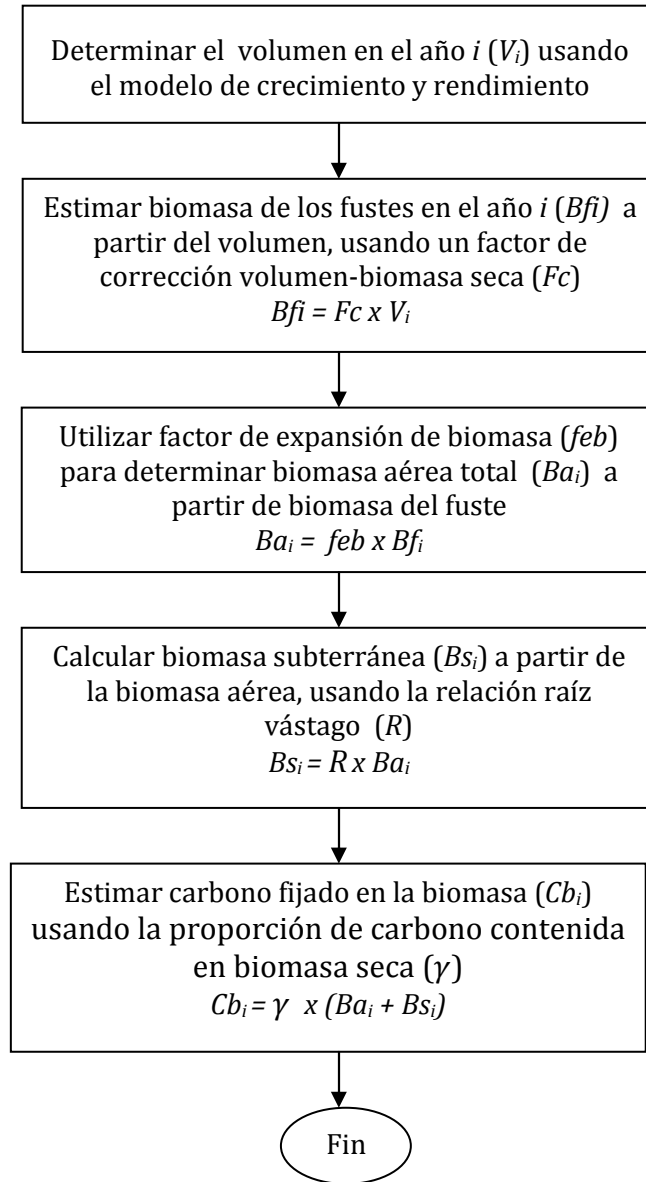


Figura 4.2. Procedimiento para calcular el carbono almacenado en la biomasa para un año cualquiera del período de planificación

El esquema de funcionamiento del modelo es el siguiente: el módulo de optimización evalúa múltiples regímenes de aclareo y al final selecciona el mejor que haya encontrado, la selección de los regímenes a evaluar sigue un procedimiento sistemático definido por la técnica de optimización seleccionada (Algoritmos Genéticos). Para evaluar una solución, el algoritmo de optimización utiliza el módulo de crecimiento y rendimiento, y el módulo carbono. El primer módulo se encarga de calcular el valor de las variables de rodal para cada año del turno, correspondiente al régimen de aclareo que se está evaluando, y permite estimar datos como volumen y diámetro del árbol medio del vuelo aclareado y de la corta final, necesarios para estimar el valor actual neto (VAN) de los flujos de caja relacionados a la producción de madera. Luego, a partir de los valores de volumen, el módulo carbono calcula el secuestro, las emisiones y el flujo neto de carbono en el rodal para cada año. Con la información que generan el módulo de crecimiento y rendimiento, y el módulo carbono, se calcula el VAN de la solución, el cual tiene dos componentes, el VAN asociado a la producción de madera y el VAN correspondiente al secuestro de carbono. El régimen de aclareo que presenta el mayor VAN se considera la solución del modelo. En la Figura 4.3 se muestra un diagrama que ilustra el funcionamiento del modelo.

Los supuestos del modelo de prescripción de aclareos del capítulo III se mantienen en el modelo que considera el secuestro de carbono, estos son:

- El turno es de 30 años.
- El primer aclareo se puede hacer a partir de los 5 años.
- Los aclareos tienen un distanciamiento mínimo de 3 años. Por tanto, el último aclareo se puede hacer 3 años antes del turno, es decir a los 27 años.
- Se asume una mortalidad del 15% en la fase de establecimiento. En la fase manejo no se toma en cuenta la mortalidad, al realizar aclareos se asume que la mortalidad no es significativa. Para el régimen de manejo que no considera aclareos, se incluye una función de mortalidad.

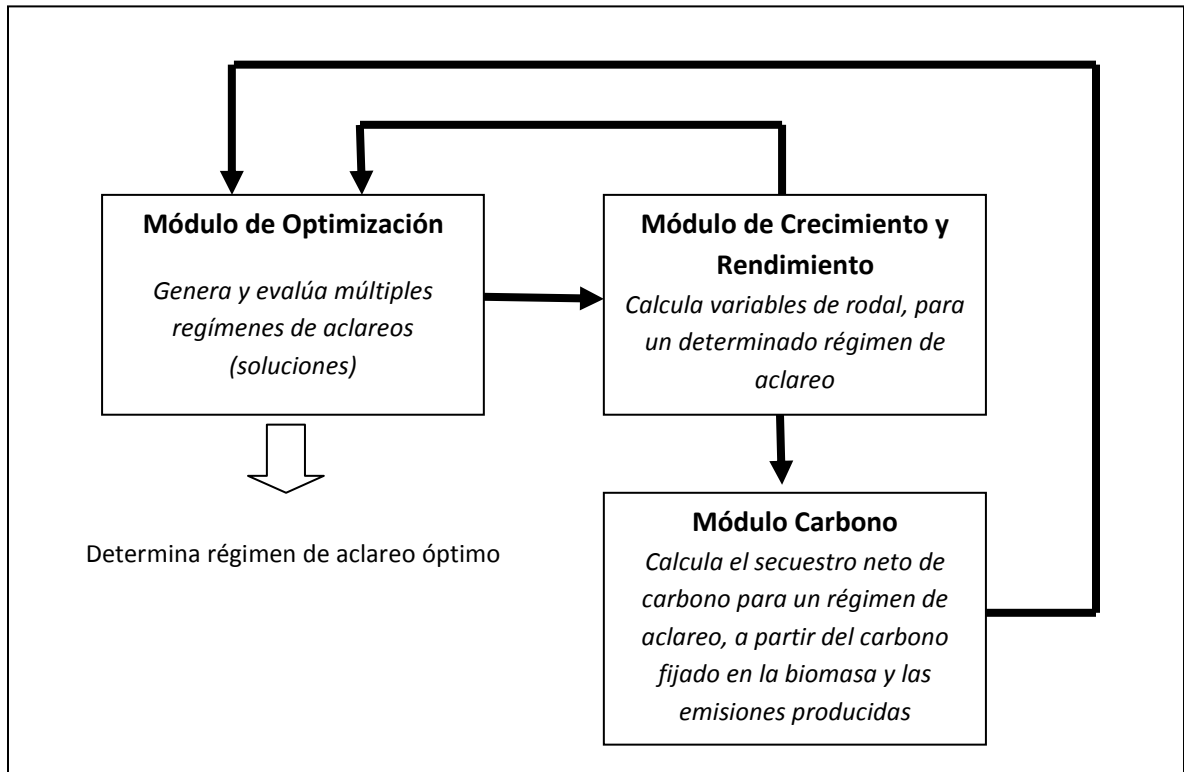


Figura 4.3. Diagrama de funcionamiento del modelo para prescribir regímenes de aclareo con secuestro de carbono

4.2.2 Modelo matemático

Seguidamente se especifican las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones del modelo de optimización.

Variables de decisión

A_j : número de años transcurridos desde el año 0 (si es el primer aclareo) o desde el aclareo anterior, para efectuar un nuevo aclareo j .

I_j : intensidad del aclareo j , expresado en porcentaje del área basal.

Función objetivo

Se refiere a la maximización del valor actual neto (VAN) de los flujos de caja ocurridos durante el turno, comprende los costos e ingresos relacionados con la producción de madera proveniente de los aclareos y la corta final, y el secuestro de carbono. En el cálculo del VAN se ignora el valor de la tierra de acuerdo al criterio de valor presente neto propuesto por Hille *et al.* (1999), el cual es utilizado en modelos de optimización forestal (Seo *et al.*, 2005; Chen y Gadov, 2008; Baskent *et al.* 2008). La función objetivo del modelo es la siguiente:

$$\text{Maximizar } Z = VAN_{madera} + VAN_{carbono} \quad [4.1]$$

donde:

VAN_{madera} : valor actual neto de los flujos de caja ocurridos durante el turno relacionados con la madera extraída de los aclareos y la corta final. Se calcula de la misma manera que en el modelo de prescripción de aclareos que no considera el secuestro de carbono.

$$VAN_{madera} = \underbrace{-\sum_{i=1}^t \frac{Cm_i}{(1+r)^i}}_I + \underbrace{\sum_{i=1}^{t-3} \left(\frac{Ingreso_i - Costo_i}{(1+r)^i} \right)}_{II} + \underbrace{\frac{Ingreso_t - Costo_t}{(1+r)^t}}_{III} \quad [4.2]$$

El término I corresponde a la sumatoria de los costos de establecimiento y mantenimiento del rodal (Cm_i) actualizados a una tasa de interés r , el II representa la sumatoria de los beneficios actualizados obtenidos en el año i ($Ingreso_i - Costo_i$) por concepto de los aclareos, y el término III de la ecuación corresponde a los beneficios actualizados obtenidos en la corta final realizada en el turno t (30 años) por concepto de producción de madera ($Ingreso_t - Costo_t$). Los ingresos por producción de madera ($Ingreso_i$ o $Ingreso_t$) se calculan multiplicando el precio de la madera, el cual depende del diámetro de árbol medio, por el volumen extraído, y los costos se refieren a costo de corta ($\$m^{-3}$) multiplicado por el volumen extraído.

$VAN_{carbono}$: valor actual neto relacionado al secuestro de carbono. Se calcula como la diferencia entre el carbono capturado por la biomasa y el carbono emitido en cada año, multiplicado por el precio asociado al secuestro de carbono (en dólares estadounidenses por tonelada de carbono, \$ tC⁻¹).

$$VAN_{carbono} = P_c \sum_{i=1}^{Td} \frac{F_i - E_i}{(1+r)^i} \quad [4.3]$$

donde:

P_c : precio del secuestro de carbono (\$ tC⁻¹).

F_i : carbono fijado en el año i (tC).

E_i : carbono emitido en el año i (tC).

Td : tiempo (años) al cual se ha descompuesto el 90% del carbono del componente (producto, residuo de las cosechas) con mayor tiempo de vida orgánico.

r : tasa de interés.

Restricciones

La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

$$ABO_{i+1} = ABf_i + ICA_{i+1,i} \quad [4.4]$$

$$ABacl_i = I_i \times AB_i \quad [4.5]$$

$$ABf_i = ABO_i - ABacl_i \quad [4.6]$$

$$A_1 \geq 5 \quad [4.7]$$

$$A_i \geq 3 \quad \text{para } i = 2, 3, 4 \quad [4.8]$$

$$I_i \geq 25 \quad \forall i \quad [4.9]$$

$$A_j \text{ es entera} \quad \forall j \quad [4.10]$$

donde:

ABO_i : área basal al inicio del año i (m² ha⁻¹).

ABf_i : área basal al final del año i (m² ha⁻¹).

$ABacl_i$: área basal aclareada en el año i ($m^2 ha^{-1}$).

AB_{max} : área basal máxima ($m^2 ha^{-1}$).

AB_{lim} : área basal limitante ($m^2 ha^{-1}$).

Las restricciones 4.4, 4.5 y 4.6 se refieren a las fórmulas de cálculo del área basal inicial, área basal aclareada y área basal final para un año del período de planificación, estos valores se determinan utilizando el modelo de crecimiento y rendimiento y en función de las variables de decisión. La restricción 4.7 está relacionada al supuesto del modelo que señala que antes de los cinco años de edad no se practican aclareos en el rodal y la restricción 4.8 indica que entre dos aclareos sucesivos deben transcurrir al menos tres años. La desigualdad 4.9 evita que la intensidad de un aclareo sea menor al 25%, ya que en la práctica no es conveniente realizar un raleo donde deban extraerse muy pocos árboles.

En este modelo no se incluyeron las restricciones de área basal que obligan a mantener esta variable entre los valores de área basal limitante y el área basal máxima. De acuerdo al análisis de sensibilidad realizado para el modelo de prescripción de regímenes aclareos descrito en el capítulo III y según algunas pruebas realizadas, el régimen de aclareo que el modelo determina depende en buena parte del cumplimiento de estas restricciones. De esta manera, si se mantienen las restricciones de área basal, los regímenes de aclareo son prácticamente los mismos que los obtenidos en el modelo que no incluye análisis de carbono. Por ello, se decidió no considerar estas restricciones, así el modelo permite analizar cómo cambian los regímenes de aclareo cuando los objetivos incluyen producir carbono además de madera.

4.2.3 Cálculo del secuestro de carbono

Fijación de carbono en la biomasa aérea

El carbono fijado por la biomasa aérea en el año i (Cba_i) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Cba_i = \Delta V_i \times d_{teca} \times feb \times \gamma \quad [4.11]$$

donde:

ΔV_i : incremento anual en volumen en $m^3 ha^{-1}$ ($V_i - V_{i-1}$).

d_{teca} : densidad básica de la teca en $t m^{-3}$

feb : factor de expansión de biomasa (para considerar hojas y ramas a partir de la biomasa del fuste)

γ : proporción de carbono en biomasa seca.

Fijación de carbono en la biomasa subterránea

Para calcular el carbono fijado por la biomasa subterránea en el año i (Cbs_i) se considera que esta es proporcional a la biomasa aérea:

$$Cbs_i = Cba_i \times R \quad [4.12]$$

donde:

Cba_i : carbono fijado por la biomasa aérea en $tC ha^{-1}$.

R : relación raíz-vástago.

Emisiones de carbono

Se utilizó el enfoque propuesto por Hoen y Solberg (1994), quienes consideran que las emisiones futuras de carbono son una función de la tasa de descomposición y el tiempo de vida orgánico de los componentes extraídos del bosque. Según estos autores las remociones en cada período de tiempo son destinadas a N_u categorías de uso final, cada una con diferentes tasas de emisión. Si se define e_k como la proporción de la biomasa total removida que es destinada a la categoría de uso k , entonces

$$\sum_{k=1}^{N_u} e_k = 1 \quad [4.13]$$

El tiempo total de vida del carbono contenido en la biomasa removida de un rodal, puede ser dividido en:

- Tiempo antrópico A_T : tiempo transcurrido desde la caída, cosecha y/o extracción del material vegetal, hasta que empieza a descomponerse; es decir, la vida útil de cada categoría de uso final de la madera y de los componentes del árbol (Lopera y Gutiérrez, 2001). Se asume que durante el tiempo antrópico no hay descomposición.
- Tiempo de descomposición D_T : tiempo que tarda en descomponerse el 90% de la biomasa, liberando carbono al ambiente.

La biomasa que se descompone en un año es una proporción de la biomasa existente en cada categoría de uso k . La proporción anual de descomposición para una categoría de uso (q_k), puede calcularse usando la siguiente ecuación:

$$q_k = 1 - 0,1^{1/D_{Tk}} \quad [4.14]$$

siendo D_{Tk} el tiempo de descomposición para la categoría de uso k .

Siguiendo este enfoque, la biomasa en cada categoría de uso se descompone a una proporción constante de la biomasa restante que aún no se ha descompuesto. Con fines prácticos, se asumió que la descomposición y la emisión se detiene para cada categoría de uso cuando se llega a una fracción muy pequeña de biomasa no descompuesta, en términos numéricos, cuando se emite una cantidad menor a 0,01 toneladas de carbono por hectárea. De esta forma, una pequeña fracción de la biomasa removida permanecerá como biomasa y nunca se descompone, por ejemplo, como carbono orgánico en el suelo (Hoen y Solberg, 1994).

La emisión en el período $i + j$ de la biomasa de la categoría de uso k removida en el período i , $E_{ik,i+j}$ se define como:

$$E_{ik,i+j} = BE_i \times e_k \times Q_{k,i+j} \quad [4.15]$$

donde:

BE_i : biomasa extraída en el período i

e_k : proporción de la biomasa total removida que es destinada a la categoría de uso k

$Q_{k,i+j}$: tasa de emisión del producto k en el período $i + j$.

La biomasa extraída (BE_i) se calcula con la siguiente ecuación:

$$BE_i = VE_i \times d_{teca} \times feb \times \gamma \times (1 + p_r) \quad [4.16]$$

donde:

VE_i : volumen extraído en el año i en $m^3 \text{ ha}^{-1}$.

d_{teca} : densidad básica de la teca en $t \text{ m}^{-3}$.

feb : factor de expansión de biomasa

γ : proporción de carbono en biomasa.

p_r : relación raíz-vástago.

La tasa de emisión del producto k en el período $i + j$ ($Q_{k,i+j}$) se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{k,i+j} = \begin{cases} 0 & \text{si } j \leq A_{Tk} \quad (\text{durante el tiempo antrópico no hay emisión}) \\ (1 - q_k)^{j-A_{Tk}} \times q_k & \text{si } j > A_{Tk} \end{cases} \quad [4.17]$$

donde:

q_k : proporción anual de descomposición para la categoría de uso k .

A_{Tk} : tiempo antrópico para la categoría de uso k .

4.2.4 Técnica de optimización utilizada para resolver el modelo

Para resolver el modelo se diseñó un Algoritmo Genético, técnica heurística que recorre el espacio de posibles soluciones, utilizando una analogía con la evolución de las especies. En cada iteración (generación) del algoritmo se obtiene una población de soluciones posibles para el problema, a partir de ésta se genera una nueva población de soluciones mediante operadores que emulan la selección entre las especies (cruzamiento y mutación). El método trabaja generación tras generación, aumentando la calidad de la mejor solución de cada población hasta que se cumpla un criterio de parada.

En el desarrollo del Algoritmo Genético se utilizaron las mismas estrategias de diseño que se emplearon para resolver el modelo de optimización de aclareos que no considera el secuestro de carbono. Estas estrategias están relacionadas con la representación de una solución usando codificación binaria, la generación de una solución inicial de manera aleatoria, y los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación; todas descritas en el capítulo III. Para medir la calidad de un régimen de aclareo que representa una posible solución del problema se utilizó como función de adaptación la función objetivo del modelo:

$$FIT(\mathbf{X}) = - \sum_{i=1}^t \frac{Cm_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^{t-3} \left(\frac{Ingreso_i - Costo_i}{(1+r)^i} \right) + \frac{Ingreso_t - Costo_t}{(1+r)^t} + P_c \sum_{i=1}^{Td} \frac{F_i - E_i}{(1+r)^i} \quad [4.18]$$

Donde:

$FIT(\mathbf{X})$: función de adaptación del Algoritmo Genético.

t : turno (30 años).

r : tasa de interés.

Cm_i : costo de establecimiento o costo de mantenimiento en el año i (\$ ha⁻¹).

$Ingreso_i$: ingreso neto percibido en el año i debido a la venta de madera extraída en un aclareo o a la corta final (\$ m⁻³).

$Costo_i$: costo del aclareo i o de la corta final (\$ m⁻³).

P_c : precio del carbono secuestrado (\$ tC⁻¹).

F_i : carbono fijado en el año i ($tC\ ha^{-1}$).

E_i : carbono emitido en el año i ($tC\ ha^{-1}$).

T_d : tiempo (años) al cual se ha descompuesto el 90% del carbono del componente (producto, residuo de las cosechas) con mayor tiempo de vida orgánico.

4.2.5. Implementación del modelo

Se desarrolló un programa usando el lenguaje Visual Basic 2010 (Microsoft Corporation, 2012), el cual determina el régimen óptimo de aclareos en función de un conjunto de datos de entrada como la calidad de sitio, densidad inicial, número de aclareos, precios de la madera según su diámetro, precio del secuestro de carbono, costo de corta, y tasa de interés. Además, el programa permite elegir si se desea hacer la optimización considerando como productos madera y secuestro de carbono, o solamente uno de ellos, con el fin de realizar comparaciones. La información que genera el programa como salida se refiere a la edad e intensidad de los aclareos que deben realizarse para obtener el mayor valor actual neto, esto es, el régimen de aclareo óptimo encontrado por el Algoritmo Genético; también proporciona una tabla que muestra los valores de las variables de rodal para cada año del turno como repuesta al régimen de aclareo óptimo. Igualmente, el programa indica los valores de secuestro, emisiones y flujo neto de carbono anuales, desde el establecimiento del rodal hasta 100 años después del turno. En el Anexo B, se muestra la interfaz de entrada y salida del programa.

4.2.6 Experimentación con el modelo

Se utilizó el modelo para determinar el régimen de aclareos óptimo en rodales de *Tectona grandis* L.f., bajo distintas condiciones experimentales. Se emplearon dos densidades iniciales (1111 y $1600\ arb\ ha^{-1}$) y calidad de sitio I, esta última definida en función del basal potencial de sitio ($m^2\ ha^{-1}$) que puede alcanzar el rodal. Los parámetros del modelo de crecimiento, los precios de la madera, los costos de establecimiento, mantenimiento y

corta, y los parámetros del Algoritmo Genético fueron los mismos que se emplearon en el modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo sin considerar secuestro de carbono, capítulo III, Tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6

Los datos para calcular la fijación y emisión anual de carbono son los siguientes:

- Precio del carbono (P_c) = 10 \$ tC⁻¹. Según Álvarez (2009) este es el valor que comúnmente se utiliza en estudios financieros que incluyen secuestro de carbono.
- Tasa de interés (r) = 10%.
- Densidad básica de la teca (d_{teca}) = 0,54 t m⁻³. Valor calculado por Pérez y Kanninen (2005) en rodales no aclareados.
- Factor de expansión de biomasa (feb) = 1,33. Valor calculado a partir de las mediciones de biomasa de *Tectona grandis* realizadas por Kraenzel *et al.* (2003).
- Proporción de carbono en biomasa (γ) = 0,495. Valor estimado por Kraenzel *et al.* (2003) para teca.
- Relación raíz-vástago (R) = 0,16. Valor promedio calculado por Kraenzel *et al.* (2003) para *Tectona grandis*.
- Número de categorías de uso (Nu) = 7. En la Tabla 4.1 se listan los diferentes usos que puede tener la biomasa extraída del rodal en una corta, cada uno con su correspondiente tiempo antrópico (A_T) y tiempo de descomposición (D_T). Se observa que los productos que se obtienen de la madera se dividieron en tres categorías, corta (estantillos), media (puntales y varetas) y larga duración (madera para aserrío). En la Tabla 4.2 se indica el porcentaje de cada tipo de producto que se puede obtener de acuerdo al diámetro del árbol medio, estos valores fueron adaptados de los estimados por Osorio(1997), tomando en consideración que aproximadamente un 45% del volumen no es aprovechado debido a la diferencia entre el volumen redondo y el volumen del bloque aprovechable (costaneras, corteza) y defectos en las trozas (Murillo, 2011). Ya que el volumen de la corteza es calculado explícitamente en el modelo, los porcentajes de la Tabla 4.2 se aplicaron al volumen sin corteza.

- Tiempo al cual se ha descompuesto el 90% del carbono del componente con mayor tiempo de vida orgánico (Td) = 106 años, que corresponde a los productos de madera aserrada de larga duración que se obtienen de la cosecha final.

$$Td = \text{turno} + At + Dt = 30 + 60 + 16 = 106 \text{ años.}$$

Tabla 4.1. Diferentes usos dados a la biomasa extraída del rodal, tiempo antrópico y tiempo de descomposición.

Categoría de uso	Tiempo antrópico (A_T) en años	Tiempo de descomposición (D_T) en años
1. Raíz	0	6
2. Madera muerta, ramas y tocones	0	16
3. Corteza	0	2
4. Desperdicios	0	1
5. Productos de corta duración	4	10
6. Productos de duración media	30	14
7. Productos de larga duración	60	16

Tabla 4.2. Porcentajes para los tipos de productos a obtener en las diferentes categorías diamétricas aplicables al volumen sin corteza

Categoría diamétrica	Porcentajes (%)			
	Productos corta duración	Productos duración media	Productos larga duración	Desperdicios
< 10	0	0	0	100
10 - 14 cm	57	18	0	25
15 - 20 cm	40	35	0	25
20 -24	26	32	17	25
25 - 29	20	30	40	10
30 - 39	20	25	45	10
>= 40	20	20	50	10

Fuente: Adaptado de Osorio (1997)

Se corrió el modelo para determinar regímenes de aclareo que consideran los siguientes objetivos de manejo: a) producción de madera para aserrío, se optimiza el VAN del flujo de caja asociado a la producción de madera (VAN_{madera} , ecuación [4.2]); b) producción de madera para aserrío y secuestro de carbono, acá se maximiza la suma del VAN relacionado a la producción de madera y el VAN del secuestro de carbono (ecuación [4.1]); y c) secuestro de carbono, se maximiza el VAN asociado al flujo de caja que ocurre debido al secuestro de carbono ($VAN_{carbono}$, ecuación [4.3]); para escenarios de optimización que incluyen desde cero hasta cuatro aclareos. Para determinar la mejor solución, en cada escenario de optimización se efectuaron 50 corridas del algoritmo y se seleccionó la solución que mostró el mayor valor actual neto.

Aunque es poco probable que un productor maneje un rodal solo para maximizar el secuestro de carbono, mucho más si se trata de una especie de alto valor comercial como la teca, este escenario fue incluido con la finalidad de hacer comparaciones y estudiar cómo afecta el régimen de aclareo aplicado en la capacidad de un rodal para secuestrar carbono. La alternativa de manejar un rodal orientado principalmente al secuestro de carbono puede tener validez cuando se trata de especies con poco o ningún valor comercial.

4.2.7. Análisis de sensibilidad

Se estudió la sensibilidad del modelo de optimización a los cambios en las siguientes variables de entrada y parámetros: costo de corta, tasa de interés, tasa de crecimiento (parámetro k de la ecuación de Chapman-Richards), precio de la madera y precio del carbono. Para el análisis de sensibilidad se utilizó una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y dos productos como objetivos del manejo (madera y carbono).

- Tasa de crecimiento (k): se efectuaron corridas realizando variaciones consecutivas de $\pm 1\%$ en el valor de este parámetro, teniendo cuidado de que los

valores de k utilizados en el análisis no condujeran a curvas de crecimiento poco factibles en la realidad.

- Variable costo de corta: se cambió entre ± 10 y $\pm 50\%$ del valor original utilizado ($14,24 \$ m^{-3}$), a intervalos de 10%.
- Variable tasa de interés: se utilizaron valores del 4%, 6%, 8%, 12%, 14%.
- Precio de la madera: para estudiar el efecto de esta variable se probaron tres escenarios variando la relación entre los precios de la madera asignados a cada categoría diamétrica: 1) todas las clases diamétricas tienen el mismo precio; 2) el precio de la madera con diámetro superior a 25 cm se duplica en relación al precio de la madera en la categoría [10 - 25) cm; 3) el precio de la madera con diámetro superior a 25 cm es tres veces mayor que el precio de la madera en la categoría [10 - 25) cm.
- Precio del carbono: se hicieron corridas aumentando el precio del carbono secuestrado, se utilizó $20 \$ tC^{-1}$, $30 \$ tC^{-1}$, $40 \$ tC^{-1}$, $50 \$ tC^{-1}$, $100 \$ tC^{-1}$, $150 \$ tC^{-1}$ y $200 \$ tC^{-1}$.

4.3 Resultados y Discusión

4.3.1 Régimen de aclareo óptimo para rodales con una densidad inicial de 1111 árboles por hectárea.

Los regímenes de aclareo que maximizan el valor actual neto encontrados por el modelo para un rodal de teca con una densidad inicial de plantación de $1111 arb ha^{-1}$, bajo las condiciones experimentales y supuestos de este estudio, se presentan en la Tabla 4.3. Se muestra el mejor programa de aclareo para cada escenario, según el número de aclareos y los objetivos de manejo del rodal.

Se observa en la Tabla 4.3 que los regímenes de aclareo óptimos son exactamente los mismos cuando el objetivo es únicamente la producción de madera, o si se incluye también el secuestro de carbono, solo se diferencian en el valor actual neto (VAN), siendo

este mayor cuando hay dos objetivos, puesto que se obtienen beneficios tanto de la madera como del carbono secuestrado. En ambos casos, el régimen de manejo que tiene un mayor VAN (régimen óptimo) es aquel que incluye tres aclareos, a los 5, 9 y 21 años, con intensidades del 31,2%, 28,1% y 48,8% del área basal, respectivamente. En orden descendente del VAN, el siguiente es el régimen que contempla dos aclareos, luego el régimen con cuatro aclareos, seguido por el que incluye un aclareo, y finalmente la alternativa de no aclarear es la que tiene un VAN más bajo. La diferencia porcentual entre el VAN del régimen con dos aclareos y el óptimo es 3,1 % cuando el objetivo es producir únicamente madera, y 3,3% cuando se produce madera y secuestro de carbono; mientras que la diferencia porcentual entre los demás regímenes y el óptimo es superior al 12%.

Tabla 4.3. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, considerando el secuestro de carbono como producto

N° de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4	VAN (\$ ha ⁻¹)
Objetivo: producción de madera									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	2260,59
1	8	69,6	-	-	-	-	-	-	6357,49
2	7	47,6	15	53,0	-	-	-	-	9086,66
3	5	31,2	9	28,1	21	48,8	-	-	9372,78
4	5	33,0	12	38,2	17	25,4	25	42,5	8168,10
Objetivo: producción de madera y secuestro de carbono									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	2882,21
1	8	69,6	-	-	-	-	-	-	6819,48
2	7	47,6	15	53,0	-	-	-	-	9559,31
3	5	31,2	9	28,1	21	48,8	-	-	9886,82
4	5	33,0	12	38,2	17	25,4	25	42,5	8646,92
Objetivo: secuestro de carbono									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	628,62
1	27	43,5	-	-	-	-	-	-	625,82
2	23	25,1	27	25,8	-	-	-	-	620,92
3	20	25,5	23	28,1	27	43,1	-	-	604,45
4	17	32,0	21	30,3	24	45,3	27	30,5	579,38

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

En el escenario en el que se considera solamente el secuestro de carbono como objetivo, el programa de manejo que presenta mayor VAN es aquel que no incluye aclareos. En este punto es necesario aclarar que en el modelo, el VAN se utiliza como un criterio para comparar regímenes de aclareo y no para calcular la rentabilidad de la inversión, por lo que un VAN positivo en el escenario que solo contempla el secuestro de carbono, no significa necesariamente que sea rentable plantar rodales de teca para dedicarlos únicamente al secuestro de carbono, ya que hay costos como por ejemplo el valor de la tierra, que no fueron incluidos en el análisis por no estar directamente relacionados a este objetivo.

Se puede notar en la Tabla 4.3 que en todos los escenarios de optimización en los que el objetivo es únicamente el secuestro de carbono, las edades en las que deben realizarse los raleos son mayores, y las intensidades más bajas, si se comparan con los regímenes que toman en consideración la madera como producto del rodal. Esto sucede debido a que en el cálculo del VAN asociado al secuestro de carbono, tienen mayor peso los flujos de carbono que ocurren más cerca del presente, por eso el modelo retrasa los aclareos para que las emisiones que se producen como consecuencia de estos afecten en menor magnitud el valor actual neto. De esta manera, cuando solo se toma en cuenta el secuestro de carbono, el modelo busca mantener la madera en pie el mayor tiempo posible, conservando así el carbono almacenado en los árboles en pie y evitando las emisiones. Un resultado similar fue reportado por Lopera y Gutiérrez (2001), al estudiar el efecto de diferentes estrategias de manejo (raleos simulados) en el comportamiento del carbono en plantaciones de *Pinus patula*; también Pohjola y Valsta (2007) encontraron que cuando los aclareos se posponen y se hacen a intensidades menores se incrementa el carbono promedio almacenado en rodales de *Pinus sylvestris* y por consiguiente el VAN.

4.3.2 Régimen de aclareo óptimo para rodales con una densidad inicial de 1600 árboles por hectárea.

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos por el modelo de optimización para un rodal de teca con una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹. Igual que ocurre para rodales con densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, los regímenes de aclareo encontrados por el modelo son los mismos si el objetivo del manejo es producir madera y cuando se incluye el secuestro de carbono como otro objetivo. En ambas situaciones el mejor régimen es el que contempla tres aclareos, a los 5, 10 y 19 años, con intensidades del 46,5%, 47,7% y 29,0% del área basal, seguido por el régimen con dos aclareos, el cual es otra opción alternativa ya que la diferencia porcentual entre el valor actual neto de ambos es aproximadamente del 1%.

Tabla 4.4. Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo en rodales de teca con una densidad inicial de 1600 árboles por ha, considerando el secuestro de carbono como producto

N° de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4	VAN (\$ ha ⁻¹)
Objetivo: producción de madera									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	709,40
1	9	79,9	-	-	-	-	-	-	6289,69
2	5	55,8	14	53,7	-	-	-	-	8982,88
3	5	46,5	10	47,7	19	29,0	-	-	9090,11
4	8	44,6	16	25,6	20	47,7	25	26,7	7898,81
Objetivo: producción de madera y secuestro de carbono									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	1385,23
1	9	79,9	-	-	-	-	-	-	6784,66
2	5	55,8	14	53,7	-	-	-	-	9470,69
3	5	46,5	10	47,7	19	29,0	-	-	9579,89
4	8	44,6	16	25,6	20	47,7	25	26,7	8471,25
Objetivo: secuestro de carbono									
0	-	-	-	-	-	-	-	-	682,66
1	27	27,9	-	-	-	-	-	-	678,25
2	23	25,2	27	25,7	-	-	-	-	672,24
3	20	26,2	24	27,4	27	48,1	-	-	661,72
4	17	26,0	21	25,4	24	36,3	27	39,0	647,52

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

Si solamente se incluye el secuestro de carbono como objetivo, la mejor alternativa es no aclarar, ya que este régimen es el que tiene mayor VAN. Aunque las operaciones de aclareo implican un incremento en el secuestro neto de carbono ya que permiten obtener madera de mayor diámetro destinada a productos con un tiempo de vida más largo, este hecho se compensa por las cantidades de carbono emitido a corto plazo, por ello si se desea maximizar el secuestro de carbono deben evitarse los aclareos (Bateman y Lovett, 2000).

En la Tabla 4.4 se observa además que en los escenarios en los que se optimiza la producción de madera, la intensidad del primer aclareo es mayor en relación a los resultados obtenidos cuando la densidad inicial del rodal es 1111 arb ha⁻¹ (Tabla 4.3). Esto puede deberse a que al haber mayor cantidad de árboles plantados, el efecto de la competencia actúa más pronto, por lo que se debe corregir aplicando un aclareo más fuerte y así favorecer el crecimiento de los árboles que quedan. Por su parte, cuando el objetivo es únicamente secuestrar carbono, los regímenes de aclareo tienen un comportamiento similar al observado para una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, los aclareos se posponen el mayor tiempo posible de acuerdo a las restricciones y supuestos del modelo, retrasando de esta manera las emisiones que ocurren después de una corta.

4.3.3 Análisis financiero para distintos escenarios de optimización

Un factor que influye de manera importante en los resultados obtenidos es el precio fijado para el secuestro de carbono. Se observa que el precio del carbono es muy bajo comparado con el precio de la madera; por ejemplo, para el caso de una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹ y dos objetivos de manejo, el régimen óptimo comprende tres aclareos, el primero a la edad de 5 años con una intensidad del 46,5% del área basal (Tabla 4.4), ese año el secuestro neto de carbono es de 13,7 toneladas por hectárea (tC ha⁻¹), lo que representa 136,5 \$ ha⁻¹ a un precio de 10 \$ tC⁻¹, y por otra parte se extrae un volumen de madera de 41,2 m³ ha⁻¹, con un diámetro promedio de 11,2 cm, lo que significa unos

ingresos de 2183,60 \$ ha⁻¹, ya que el precio del metro cúbico de madera con ese diámetro se estableció en 53 \$. Como puede notarse, los ingresos que se obtienen por la venta de madera son mucho mayores a los obtenidos por el secuestro de carbono, a pesar de que en el año 5 hay un secuestro neto de carbono considerable ya que el rodal crece a una tasa alta de acuerdo al modelo de crecimiento utilizado y hay pocas emisiones de carbono, y además la madera proveniente del aclareo es de diámetro pequeño, con menor valor comercial que la madera que puede extraerse en años posteriores. De esta manera, en la función objetivo tienen mucho más peso los beneficios económicos de la producción de madera que los obtenidos por secuestrar carbono, y esto determina el régimen de aclareo óptimo. Por esta razón, los regímenes óptimos son los mismos cuando se optimiza solamente la producción de madera y cuando se consideran dos productos, madera y carbono. Además, debido al precio bajo del carbono secuestrado, el VAN de los regímenes de aclareo que incluyen solamente el secuestro de carbono como producto es mucho menor al registrado cuando se considera la madera para aserrío.

Al analizar los resultados obtenidos para las dos densidades iniciales estudiadas, es posible apreciar que cuando se optimizan dos objetivos, madera y secuestro de carbono, los regímenes de manejo que presentan mayores beneficios son obtenidos en rodales con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹. Si el objetivo del manejo es únicamente el secuestro de carbono, el mayor valor actual neto se obtiene en los regímenes de manejo que tienen una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹. En las Figuras 4.3 y 4.4 se observa una comparación del VAN obtenido en los distintos escenarios de optimización, se calculó también el VAN que se obtendría por concepto de la producción de madera si se aplica un régimen de aclareo que maximiza el secuestro de carbono.

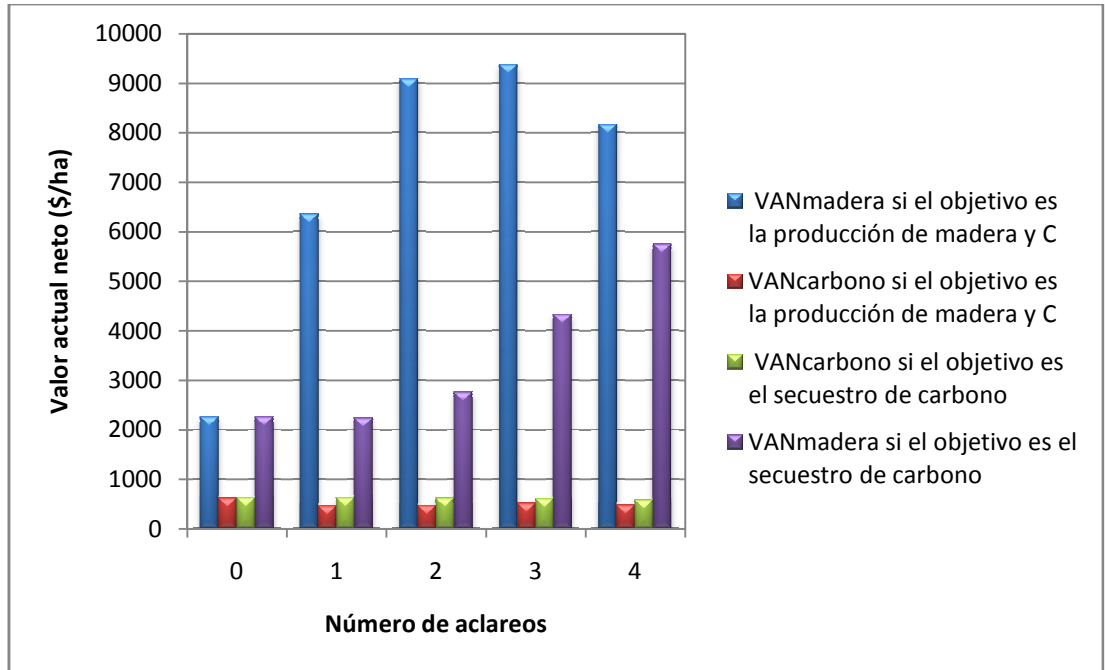


Figura 4.4. VAN de los mejores regímenes de aclareo (densidad inicial=1111 arb ha⁻¹)

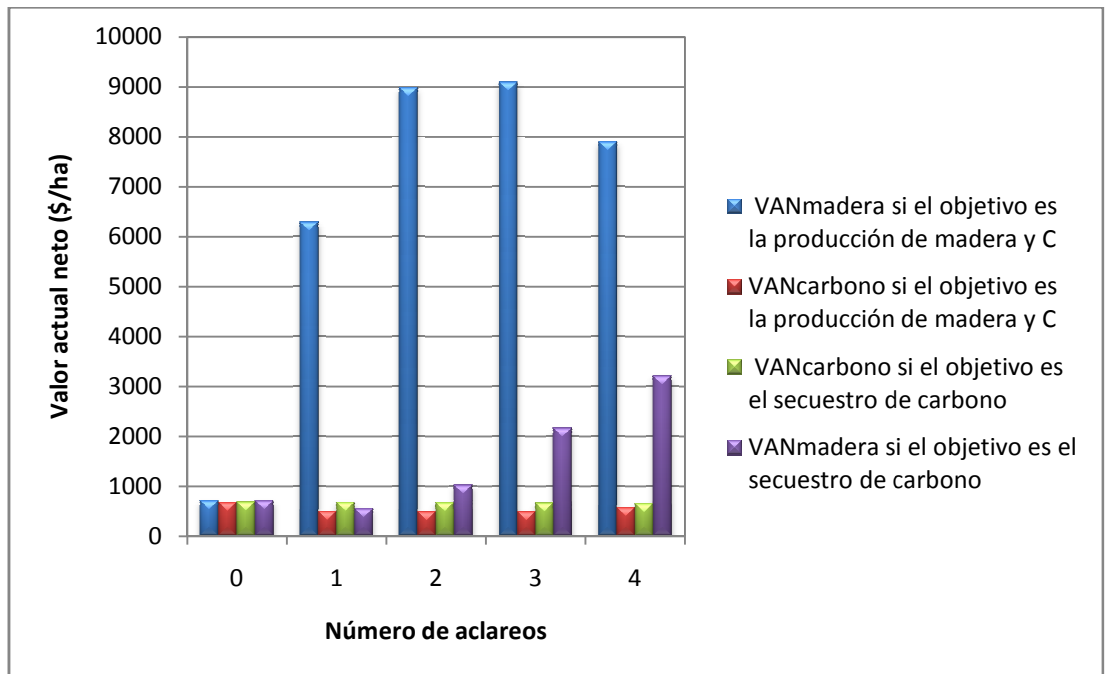


Figura 4.5. VAN de los mejores regímenes de aclareo (densidad inicial=1600 arb ha⁻¹)

Las Figuras 4.4 y 4.5 muestran cómo varía el valor actual neto de los flujos de caja relacionados a la producción de madera (VAN_{madera}) y al secuestro de carbono ($VAN_{carbono}$), de acuerdo a los objetivos del manejo. Si el objetivo es el secuestro de carbono, los beneficios que se obtendrían por la producción de madera son bastante menores que si se consideran conjuntamente madera y secuestro de carbono como objetivos del manejo. En rodales con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, al aplicar el régimen de aclareo que maximiza el secuestro de carbono (0 aclareos), el VAN que podría obtenerse por la producción de madera (VAN_{madera}) es 2260,59 \$ ha⁻¹, y si se incluyen madera y secuestro de carbono en la optimización, el VAN_{madera} para el mejor régimen de aclareo (3 aclareos) es de 9372,78 \$ ha⁻¹, la diferencia entre ambos es alta, 7112,19 \$ ha⁻¹ (75,9%), esta cantidad sería lo que se deja de ganar por concepto de producción de madera si se aplica un régimen de manejo que optimiza el secuestro de carbono. Por su parte, el $VAN_{carbono}$ del régimen que optimiza el secuestro de carbono (0 aclareos) es 628,62 \$ ha⁻¹, y el que se obtiene cuando se aplica el mejor régimen para dos objetivos de manejo (3 aclareos) es de 472,65 \$ ha⁻¹, la diferencia entre ambos es 155,97 \$ ha⁻¹ (24,8%), que corresponde a los beneficios que se dejarían de obtener por concepto de secuestro de carbono si el manejo se orienta a la producción de madera.

Para rodales que tienen una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹, la diferencia entre el mayor VAN_{madera} obtenido cuando se optimizan madera y secuestro de carbono (régimen de 3 aclareos), y el registrado en el régimen que maximiza el secuestro de carbono (0 aclareos) es del 92,2%, siendo 8380,71\$ ha⁻¹ mayor cuando se consideran madera y carbono conjuntamente en la optimización; mientras que el $VAN_{carbono}$ es 219,62 \$ ha⁻¹ (44,8%) superior cuando el manejo se orienta únicamente al secuestro de carbono.

Estas diferencias entre los beneficios que resultan de manejar un rodal para incrementar el secuestro de carbono y de manejarlo para la producción de madera, pueden ser vistas como el precio mínimo requerido para asegurar que los productores forestales adopten estrategias de manejo orientadas a incrementar el secuestro de carbono (McCarney *et al.*, 2006). Por ejemplo, un productor que planta un rodal a una densidad inicial de 1111 arb

ha⁻¹ y que tiene como objetivo la producción de madera, puede considerar la posibilidad de realizar cambios en las estrategias de manejo para orientarlas al secuestro de carbono si recibe un estímulo de 7112,19 \$ ha⁻¹, el cual es el equivalente a la cantidad que dejaría de ganar por concepto de producción de madera si aplica un régimen de aclareo que maximiza el $VAN_{carbono}$.

Estos resultados sugieren que la mejor opción en función de maximizar los beneficios económicos, es aplicar un régimen de aclareo que maximice el valor actual neto de la producción de madera y del secuestro de carbono conjuntamente. En ese caso se logra un $VAN_{carbono}$ menor que si se optimiza sólo el secuestro de carbono, pero se alcanza un VAN_{madera} mucho mayor, lo cual hace que los beneficios económicos del rodal sean superiores. De esta manera, las empresas forestales pueden considerar el carbono como un producto adicional de la plantación, mientras se produce madera para su comercialización.

Un comportamiento similar en el valor actual neto, fue encontrado por Nepal *et al.* (2012), quienes analizaron el potencial de incrementar el carbono secuestrado en rodales de *Pinus taeda* L. y *Quercus pagoda* Raf. y estudiaron las relaciones financieras entre la producción de madera y el secuestro de carbono a nivel de rodal. Otros autores como Báckeus *et al.* (2005), Keles y Baskent (2007), Baskent *et al.* (2008), y Raymer *et al.* (2009), también encontraron que al implementar prácticas de manejo que incrementan el secuestro de carbono a nivel de bosque (múltiples rodales), los beneficios económicos obtenidos del aprovechamiento de la madera disminuyen, por lo que es necesario sacrificar un objetivo en función del otro.

4.3.4 Comportamiento de las variables de rodal

A fin de estudiar el desarrollo del rodal bajo los regímenes de aclareo óptimos encontrados por el modelo, se realizaron gráficos de área basal, diámetro, volumen y densidad, para dos situaciones: a) maximización de los beneficios obtenidos por la

producción de madera y el secuestro de carbono, y b) maximización de los beneficios obtenidos por el secuestro de carbono. Solamente se presentan gráficos para una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, ya que en este escenario se obtuvo el régimen de aclareo con mayor valor actual neto, además el comportamiento de las variables de rodal cuando la densidad inicial es 1600 arb ha⁻¹ es similar.

En la Figura 4.6 se muestran los gráficos de desarrollo del rodal durante el turno para los escenarios en los que se considera la madera como un objetivo del manejo, ya sea como único objetivo o cuando se incluye además el secuestro de carbono, es importante recordar que los mejores regímenes de aclareo son los mismos en ambos casos.

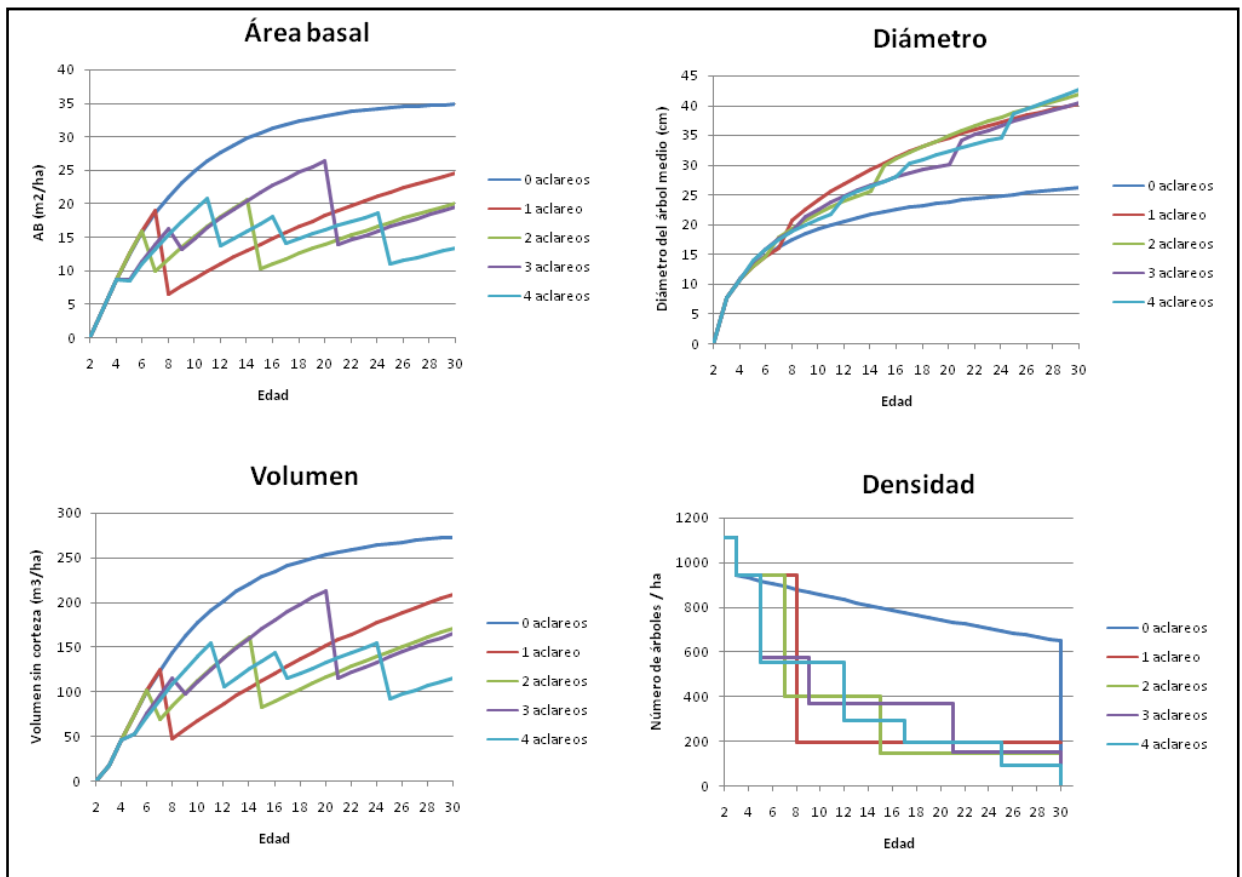


Figura 4.6. Desarrollo del rodal bajo regímenes de manejo que incluyen una densidad inicial de 1111 árboles por ha y la producción de madera como objetivo

Se puede apreciar en la Figura 4.6 que en un rodal sin aclarear, el área basal crece de acuerdo a la ecuación de crecimiento de Chapman-Richards hasta alcanzar la capacidad de carga del sitio. Una forma funcional similar se observa en el crecimiento en volumen (sin corteza), alcanzando en el turno un valor de $272,9 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$, correspondiente a una densidad final de 648 arb ha^{-1} y un valor del diámetro del árbol medio de $26,16 \text{ cm}$. Por su parte, en los regímenes de manejo que incluyen aclareos el comportamiento de las variables de rodal es diferente, como es de esperarse al practicar un raleo, el área basal, el volumen y la densidad del rodal disminuyen dependiendo de la intensidad del mismo, mientras que el diámetro del árbol medio se incrementa, ya que al tener los árboles remanentes mayor espacio para desarrollarse y disminuir la competencia, el crecimiento diamétrico es mayor, siendo este el objetivo primordial de los aclareos. En el escenario que comprende tres aclareos el cual corresponde a la solución óptima, el primer aclareo se realiza a los 5 años cuando el área basal alcanza $12,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, se extrae el 31,2% del área basal que es equivalente al 39,3 % de los árboles si se aplica un aclareo por lo bajo, esto es 371 arb ha^{-1} ; el segundo aclareo se realiza a los 9 años cuando el rodal tiene un área basal de $18,3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, a una intensidad de 28,1% del área basal, correspondiente a 204 árboles (35,6%); el tercer aclareo se realiza a los 21 años cuando el rodal alcanza un área basal de $27,1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, se extrae el 48,8% del área basal que corresponde a 218 árboles (59,1%), después de esta intervención el rodal continúa creciendo hasta la edad del turno. Bajo este régimen de aclareo, el área basal después del año 5 se mantiene entre 11 y $27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, al final del turno el área basal es de $19,4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, el volumen sin corteza es $165,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, el diámetro del árbol medio es $40,5 \text{ cm}$ y la densidad igual a 151 árboles. Aunque el volumen en el turno para la solución óptima es menor al volumen estimado en un rodal no aclareado, al ser el diámetro del árbol medio superior, la madera que se obtiene es de mayor valor comercial. Análisis similares pueden realizarse para los escenarios de optimización que comprenden uno, dos o cuatro aclareos.

En la Figura 4.7 se presentan los gráficos de las variables de rodal cuando el objetivo es únicamente la producción de carbono.

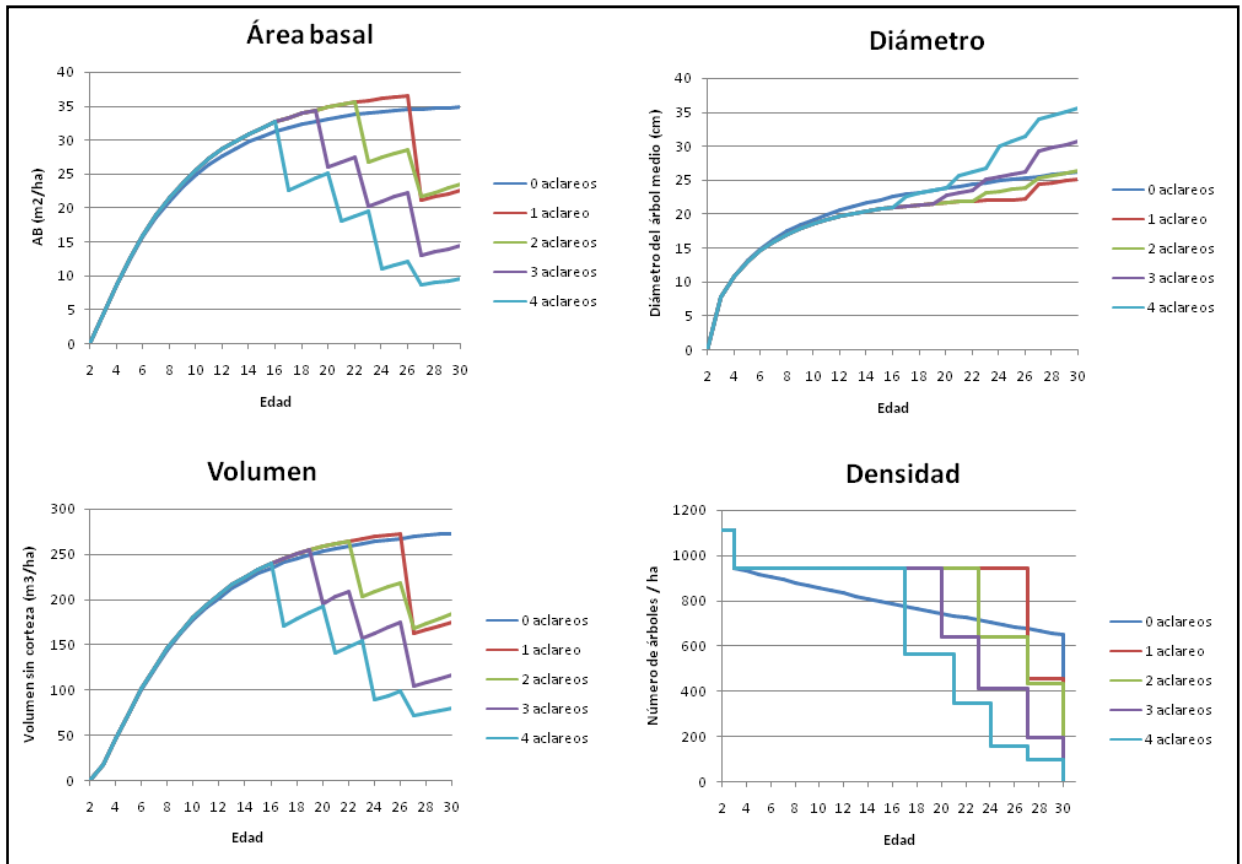


Figura 4.7. Desarrollo del rodal bajo regímenes de manejo que incluyen una densidad inicial de 1111 árboles ha⁻¹ y el secuestro de carbono como único objetivo

Se puede apreciar en la Figura 4.7 que el desarrollo del rodal es diferente si se compara al observado cuando se considera la madera como objetivo de optimización. En este caso los aclareos se efectúan más tarde, por esta razón los cambios en área basal, diámetro, volumen y densidad que ocurren debido a los raleos, se observan en la segunda mitad del turno. El régimen que mostró mayor valor actual neto por concepto de secuestro de carbono es aquel que no contempla aclareos, si se aplica este programa de manejo se observa que al final del turno el área basal es de 34,8 m² ha⁻¹, el volumen sin corteza es 272,9 m³ ha⁻¹, el diámetro del árbol medio es 26,2 cm y la densidad igual a 648 árboles. Comparando estos valores con los obtenidos cuando se incluye la madera como objetivo del manejo, se tiene que el área basal, el volumen y la densidad final son superiores, ya

que los aclareos se realizan a una intensidad menor; tal como se mencionó anteriormente, el modelo busca mantener una buena cantidad de árboles en pie para conservar el carbono almacenado en su biomasa y evitar las emisiones que ocurren después de las cortas. Se observa también que el diámetro del árbol medio al final del turno es 14,3 cm menor que cuando se tiene como objetivo la producción de madera, es por ello que los beneficios obtenidos son mucho más bajos.

4.3.5 Análisis del secuestro de carbono

Las salidas del modelo permiten hacer un análisis del flujo de carbono en el rodal, bajo el régimen de aclareo óptimo y distintos escenarios de optimización. En esta sección se presentan gráficos del comportamiento del flujo de carbono en rodales de teca, para regímenes de manejo que consideran una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y un turno de 30 años. En los gráficos se muestran dos regímenes de aclareo, el que incluye tres aclareos por ser el que presenta mayor VAN cuando se optimiza la producción de madera conjuntamente con el secuestro de carbono, y la alternativa de no aclarear, ya que este es el régimen que maximiza el VAN cuando el secuestro de carbono es el único objetivo del manejo. En la Figura 4.8 se muestra el comportamiento del secuestro neto de carbono anual (captura - emisiones).

Se observa que el secuestro neto de carbono alcanza su mayor valor a los 4 años de edad, ya que entre los 3 y 4 años es el período en el que ocurre el mayor incremento en área basal y por ende en biomasa, capturándose más carbono de la atmósfera. A partir de este año el secuestro neto de carbono anual comienza a disminuir, en el escenario que no contempla aclareos, se observa una curva que se acerca a 0 en los últimos años del turno, ya que el rodal detiene su crecimiento al haber alcanzado su capacidad de carga, por lo tanto no secuestra más carbono y se mantiene en equilibrio. En el régimen que incluye tres aclareos, se pueden ver disminuciones del secuestro neto de carbono en forma de picos, estos ocurren cuando se realiza un raleo debido a las emisiones que producen los desechos de las cortas; luego, el secuestro neto de carbono comienza a incrementarse

nuevamente a medida que el rodal continúa su crecimiento. Obviamente, la disminución más importante en el secuestro neto de carbono se observa a la edad del turno (30 años), ya que en ese momento se hace la corta total del rodal y se producen las mayores emisiones. En algunos años posteriores al turno también se observan pequeños picos en el secuestro neto de carbono, estos representan las emisiones que genera la descomposición de los productos forestales obtenidos de la cosecha final cuando se agota su tiempo antrópico; por ejemplo, se pueden apreciar picos en los años 60 y 90, los cuales corresponden a las primeras emisiones generadas por los productos forestales de mediana y larga duración obtenidos de la madera cosechada en el turno, los cuales comienzan a descomponerse después de 30 y 60 años, respectivamente. A partir del año 115 aproximadamente, el secuestro neto se hace igual a cero, ya que no hay captura ni emisiones de carbono.

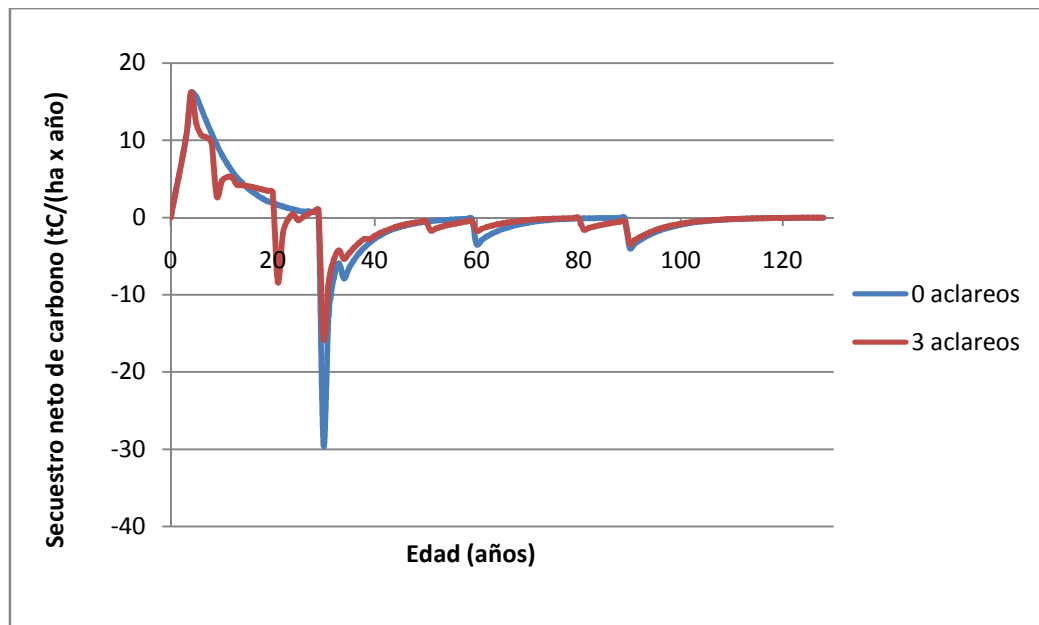


Figura 4.8. Secuestro neto de carbono en un rodal de teca asociado a turno de 30 años

Utilizando los datos de carbono que el modelo genera, se calculó la tasa promedio de secuestro de carbono, si la densidad inicial es 1111 arb ha⁻¹, esta es igual a 5,4 tC ha⁻¹ año⁻¹ para rodales no aclareados, 4,2 tC ha⁻¹ año⁻¹ cuando se implementa el régimen con un aclareo, 3,6 tC ha⁻¹ año⁻¹ para dos aclareos, 4,1 tC ha⁻¹ año⁻¹ para el régimen que incluye tres aclareos y 3,4 tC ha⁻¹ año⁻¹ en rodales con cuatro aclareos, la media de estos valores es 4,1 tC ha⁻¹ año⁻¹. En rodales con una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹, las tasas promedio de fijación de carbono son 5,4 tC ha⁻¹ año⁻¹ (0 aclareos), 3,6 tC ha⁻¹ año⁻¹ (1 aclareo), 3,7 tC ha⁻¹ año⁻¹ (2 aclareos), 3,7 tC ha⁻¹ año⁻¹ (3 aclareos) y 3,2 tC ha⁻¹ año⁻¹ (4 aclareos), con un valor medio de 3,9 tC ha⁻¹ año⁻¹. Los valores de la tasa de secuestro de carbono encontrados en este trabajo son similares al valor que reporta el IPCC (1996) para la teca, esto es, un incremento promedio anual de materia seca acumulada en la biomasa en plantaciones forestales igual a 8 tC ha⁻¹ año⁻¹, que representa una tasa de fijación de carbono de 4 tC ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados obtenidos también se encuentran en los rangos de fijación de carbono establecidos en otros estudios, como el realizado por Jordan (1983), quien a partir de información recopilada para bosques tropicales de diferentes partes del mundo encontró que las tasa de fijación de carbono varían entre 2,29 y 5,05 tC ha⁻¹ año⁻¹, asimismo Brown *et al.* (1986) calcularon que el rango de variación potencial de fijación de carbono fluctúa entre 2,7 y 9,6 tC ha⁻¹ año⁻¹ en plantaciones tropicales.

En la Figura 4.9 se muestra el comportamiento del carbono almacenado correspondiente un rodal de teca, bajo el régimen con tres aclareos y el régimen sin aclareos. Los valores representados en el gráfico incluyen el carbono almacenado en los árboles en pie, en productos forestales y en desechos de las cosechas (madera muerta y desperdicios). Se observa que a la edad del turno se ha acumulado 145,8 tC ha⁻¹ cuando no hay aclareos y 109,9 tC ha⁻¹ si se practican tres aclareos. En los años siguientes a las cortas, ya sea un aclareo o la corta final, el carbono almacenado en la biomasa extraída se va liberando según las tasas de emisión consideradas para cada componente, esto es, productos de la madera y los residuos de la cosecha. Por esta razón, en la Figura 4.9 en la curva correspondiente al régimen con tres aclareos se puede apreciar una disminución

pronunciada en el carbono secuestrado en el año 21, después del tercer aclareo, en los años 5 y 9 (edades del primero y segundo aclareo) el carbono acumulado no disminuye, ya que el secuestro de carbono que se produce debido al crecimiento en biomasa supera las emisiones generadas. Se observa también que después del turno (año 30) el carbono almacenado comienza a disminuir a causa de las emisiones que se producen luego de la corta final. Sin embargo, a los 90 años todavía se mantienen secuestrados en productos forestales $25,5 \text{ tC ha}^{-1}$ si se adopta la alternativa de no aclarear y $22,5 \text{ tC ha}^{-1}$ para el régimen de tres aclareos.

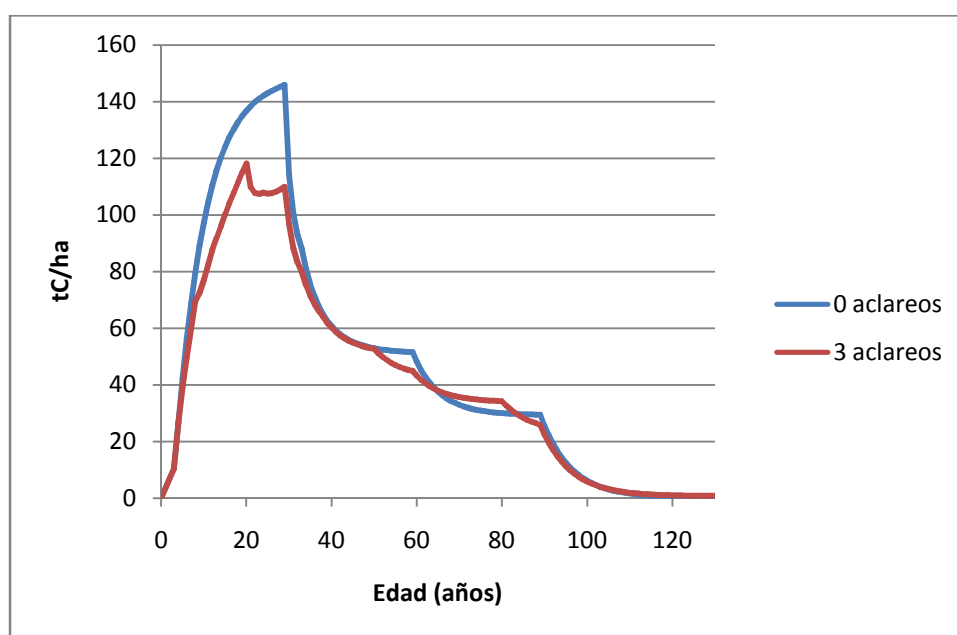


Figura 4.9. Carbono almacenado en árboles en pie, productos forestales y desechos correspondientes a un rodal de teca con un turno de 30 años y considerando la producción de madera como objetivo del manejo

Los resultados sobre carbono almacenado en rodales de *Tectona grandis* L.f. no aclareados, pueden ser comparados con los valores obtenidos por Kraenzel *et al.* (2003), quienes estimaron el potencial de secuestro de carbono en cuatro plantaciones de teca en Panamá, a los 20 años de edad y con una densidad promedio de 624 arb ha^{-1} . Estos

autores calcularon que las plantaciones estudiadas, las cuales habían recibido muy poco manejo (solo aclareo natural), almacenaban en promedio $120,2 \text{ tC ha}^{-1}$ en los árboles en pie, variando entre 100 y 141 tC ha^{-1} . Con el modelo desarrollado en este trabajo, se estimó que un rodal no aclareado a los 20 años tiene almacenado un total de $136,8 \text{ tC ha}^{-1}$ en los árboles en pie, este valor se encuentra en el rango de variación del carbono almacenado que obtuvieron los mencionados autores. Otro estudio sobre el potencial de la teca como sumidero de carbono, es el realizado por EcoBosques (s/f), el cual reporta $109,8 \text{ tC ha}^{-1}$ en un turno de 16 años, con una densidad inicial de 833 arb ha^{-1} en rodales con tres aclareos, a los 4 años (AB extraída = 40%), 8 años (AB extraída = 30%) y 12 años (AB extraída = 20%). Con el modelo desarrollado en este trabajo se estimó que en rodales con una densidad inicial de 1111 arb ha^{-1} y bajo los regímenes óptimos de aclareos, el carbono secuestrado a los 16 años oscila entre $83,5$ y $104,0 \text{ tC ha}^{-1}$, las diferencias entre los resultados de ambos estudios se deben a que los regímenes de manejo utilizados son distintos. Por otra parte, Cubero y Rojas (1999) estudiaron parcelas de teca en Costa Rica que han sido sometidas a aclareos (no especifican edades ni intensidades) y valoraron el carbono almacenado en el fuste a la edad de 24 años en $64,8 \text{ tC ha}^{-1}$; si a este resultado se le aplican los factores de expansión de biomasa y la relación raíz vástago utilizadas en este trabajo para calcular el carbono fijado en la biomasa aérea, se obtiene un estimado de $100,0 \text{ tC ha}^{-1}$. Por otra parte, con el modelo se estimó que para parcelas con aclareos (1-4 aclareos) el carbono almacenado en los árboles en pie a los 24 años está entre $87,2$ y $107,9 \text{ tC ha}^{-1}$ si se considera la madera como un producto, lo cual está en concordancia con los resultados obtenidos por Cubero y Rojas (1999).

En esta investigación se estimó que en rodales de teca plantados a una densidad inicial de 1111 arb ha^{-1} , al momento del turno (30 años) hay almacenadas entre $92,4$ y $145,9 \text{ tC ha}^{-1}$ en los árboles en pie, en productos forestales obtenidos de los aclareos y desechos de las cortas, dependiendo del régimen de aclareos aplicado cuando se consideran dos productos, madera y carbono; y en rodales con una densidad inicial de 1600 arb ha^{-1} esta cantidad está entre $87,2 \text{ tC ha}^{-1}$ y $145,1 \text{ tC ha}^{-1}$. Estos valores se pueden comparar con los calculados para otras especies forestales, siendo similares a los reportados por Nabuurs y

Mohren (1995) para *Pinus radiata* en Nueva Zelanda y Australia (171 tC ha^{-1}), *Pinus elliotti* en Brasil (111 tC ha^{-1}), *Pinus caribaea* en Brasil y Venezuela (89 tC ha^{-1}) en rotaciones de 45 años, 30 años y 25 años respectivamente, en sitios de productividad media.

Finalmente, en las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se presentan gráficos para el carbono almacenado en las distintas categorías de productos forestales (corta, media y larga duración), bajo el régimen que prescribe tres aclareos y la alternativa de no aclarear. Se observa en la Figura 4.10 que en productos de corta duración tales como estantillos y paraleles, se almacena carbono a partir del año 5 para el régimen que incluye tres aclareos, puesto que a esta edad se realiza el primer raleo. Este carbono se mantiene en los productos por cuatro años que es el tiempo antrópico establecido para esta categoría, luego comienza su descomposición y la liberación del carbono almacenado. Se puede apreciar en el gráfico que el carbono almacenado en productos de corta duración aumenta después del segundo y tercer aclareo, a los 9 y 21 años, debido a que un porcentaje de la madera extraída en esas cortas se destina a productos de este tipo.

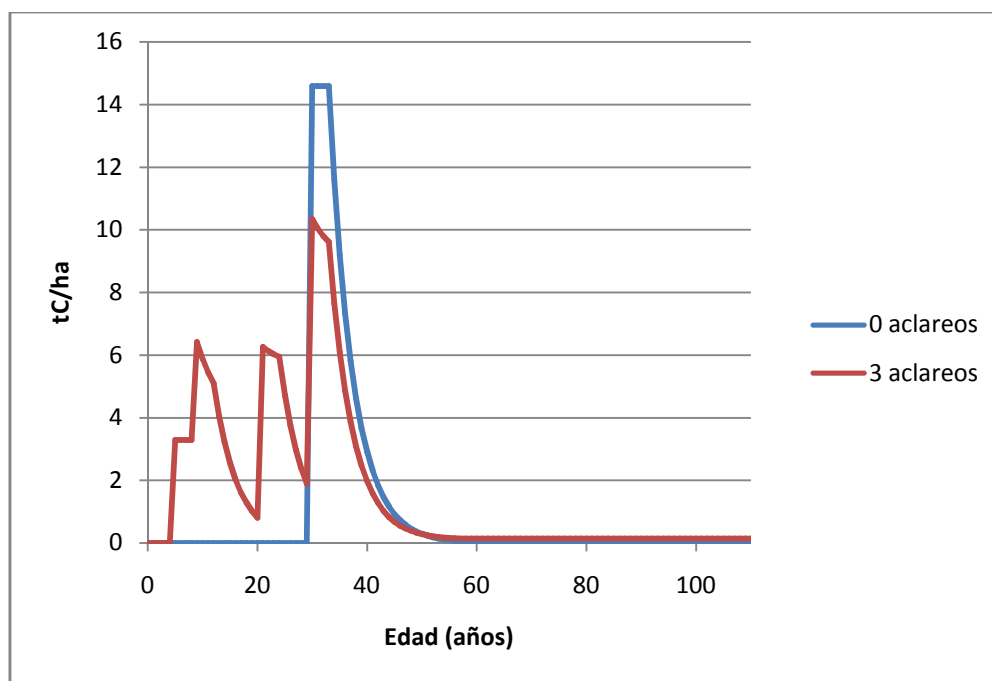


Figura 4.10. Carbono almacenado en productos forestales de corta duración

Para los rodales no aclareados, es a partir del turno cuando se comienza almacenar carbono en productos forestales, ya que antes no se ha llevado a cabo alguna corta. En los años siguientes al turno, se observa que cuando no se practican aclareos se puede almacenar más carbono en productos de corta duración en comparación al régimen con tres aclareos, debido a que el volumen cosechado en el régimen sin aclareos es mayor y el diámetro de los árboles es menor, por consiguiente mayor cantidad de la madera aprovechada se dedica a productos de corta duración. El carbono se mantiene en los productos de corta duración obtenidos de la cosecha final hasta el año 34, momento en el que comienzan a descomponerse, culminando la liberación el carbono almacenado alrededor del año 55.

La Figura 4.11 muestra el carbono almacenado en productos de duración media tales como puntales y varetas, se puede apreciar que bajo el régimen que contempla tres aclareos se comienza a almacenar carbono en esta categoría de productos desde que se realiza el primer aclareo, aumentando después de realizar el segundo aclareo, el tercer aclareo y la corta final, debido a que en cada corta se obtienen productos de media duración. En el régimen que no incluye aclareos, se almacena carbono en productos de duración media después de la edad del turno. Se observa además que a los 60 años aún se mantienen cantidades importantes de carbono almacenado en este tipo de productos, siendo mayores para el régimen que no incluye aclareos. A partir de este año, comienzan las emisiones de carbono de los productos de media duración obtenidos de la cosecha final ya que su vida útil es de 30 años.

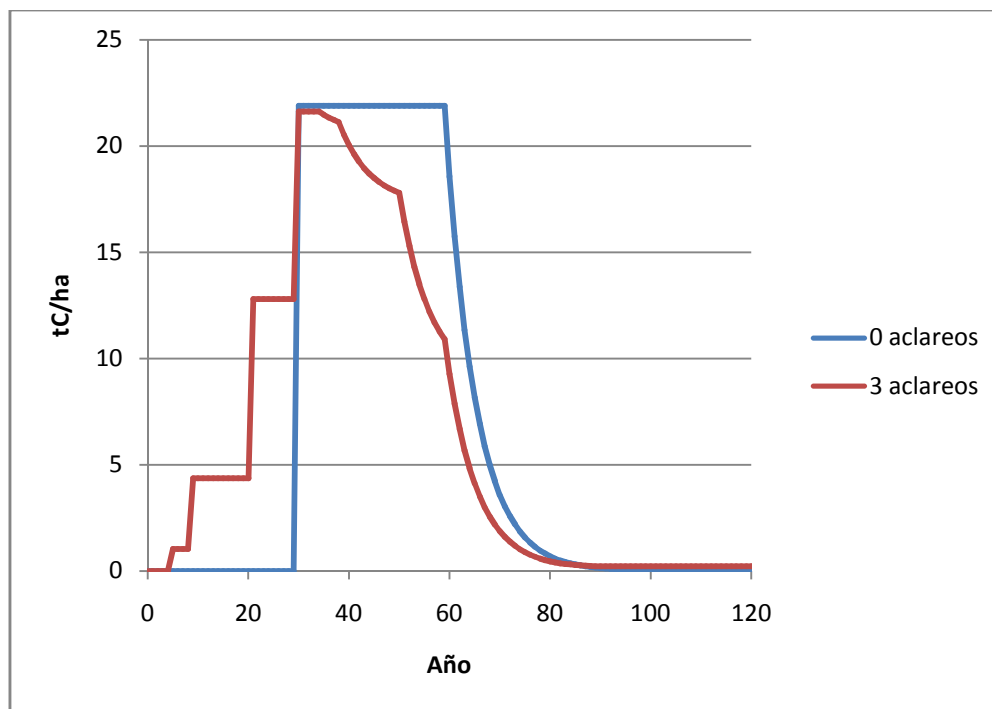


Figura 4.11. Carbono almacenado en productos forestales de duración media

En la Figura 4.12 se puede apreciar el carbono almacenado en los productos de larga duración tales como machihembrado y vigas. Cuando se realizan tres aclareos este tipo de productos se obtiene de la madera aprovechada en el tercer aclareo y en la corta final, ya que la madera extraída en los aclareos anteriores no tiene el diámetro mínimo requerido. El carbono almacenado en los productos de larga duración se mantiene por 60 años, por esta razón se observa que en el régimen con tres aclareos hay una disminución en el carbono almacenado el año 81 (60 años después del tercer aclareo) y luego la curva disminuye más rápidamente a partir del año 90 (60 años después del turno). En el escenario en el que no se incluyen aclareos, el carbono almacenado en productos de larga duración se mantiene desde el turno hasta el año 90. Las cantidades de carbono almacenado varían de acuerdo al régimen de aclareos, siendo mayor en el régimen con tres aclareos, ya que al momento del turno este régimen origina madera de un diámetro superior y por consiguiente mayor porcentaje del volumen cosechado puede dedicarse a productos de larga duración.

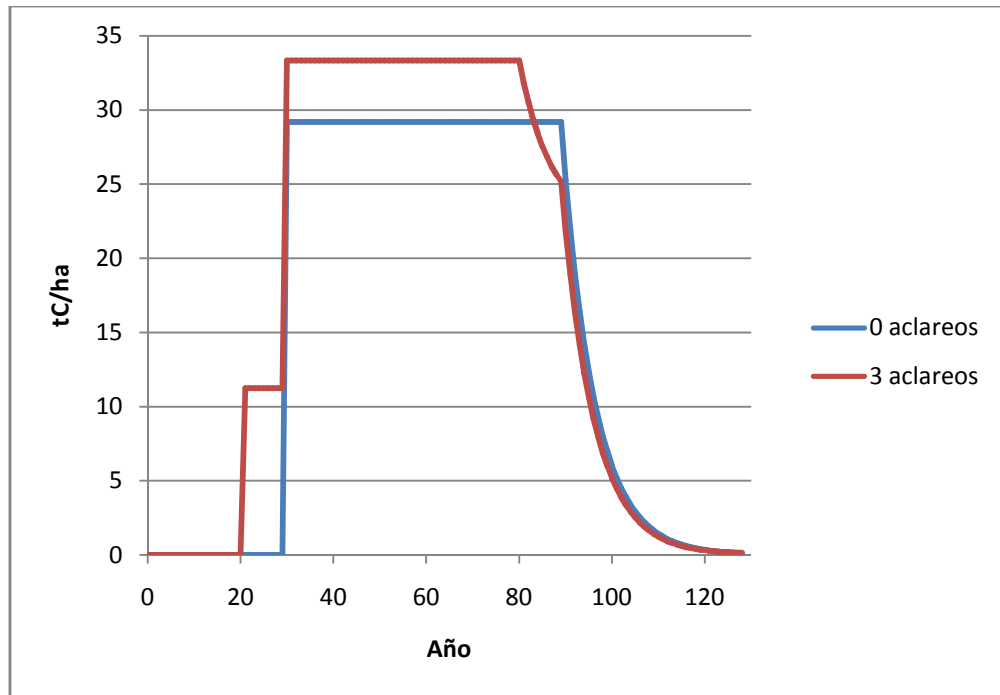


Figura 4.12. Carbono almacenado en productos forestales de larga duración

Los resultados anteriores indican que las plantaciones de *Tectona grandis* tienen potencial para secuestro y almacenamiento de carbono. En este trabajo se analizó el secuestro de carbono solamente para un turno, pero si el área se mantuviera por varios turnos bajo plantación forestal y asumiendo buenas prácticas de manejo, la cantidad de carbono secuestrado en forma de productos forestales por más de 90 años puede ser una buena alternativa de secuestro de carbono, que valdría la pena comparar con otros procedimientos que se están proponiendo actualmente, tales como inyección de carbono en el suelo, inyección directa en los océanos o inyección en formaciones geológicas subterráneas.

4.3.6 Análisis de sensibilidad

Parámetro “tasa de crecimiento k ”

El modelo fue muy sensible a variaciones en la tasa de crecimiento (parámetro k de la ecuación de Chapman-Richards de crecimiento en área basal), en la mayoría de los escenarios de optimización la solución óptima del modelo cambia al incrementar o disminuir el valor de k por lo menos en un 1%. Las variaciones en las edades e intensidades de los aclareos en los regímenes óptimos no siguen un patrón definido, lo cual dificulta hacer una asociación directa entre el cambio en la tasa de crecimiento y el régimen de aclareo óptimo.

En lo que se refiere al mejor escenario de optimización, al aumentar la tasa de crecimiento en 6% o más, o al disminuirla en al menos 1%, el régimen con dos aclareos es el que tiene mayor valor actual neto y por consiguiente es el óptimo. Solamente si el incremento en la tasa de crecimiento está entre 1% y 6% la solución óptima sigue siendo el régimen con tres aclareos.

Variable “costo de corta”

Los cambios en los valores del costo de corta no afectan los regímenes de aclareo óptimos, las edades e intensidades de los raleos son los mismos en todos los escenarios de optimización. Sin embargo, cuando el costo de corta se incrementa en más del 50%, el régimen que incluye dos aclareos es el mejor, presentando el mayor VAN, de esta manera, el régimen con tres aclareos deja de ser el óptimo ya que los aclareos se hacen más costosos. Si el incremento en el costo de corta es inferior al 50% o si el costo de corta disminuye, la mejor solución sigue siendo al régimen que incluye tres aclareos.

Variable “tasa de interés”

Cuando se cambia el valor de la tasa de interés, en algunos escenarios de optimización se modifica la solución óptima. En la Tabla 4.5 se muestra un resumen de los resultados del análisis de sensibilidad correspondiente a esta variable financiera.

Tabla 4.5. Análisis de sensibilidad del modelo de aclareos con secuestro de carbono para la variable “tasa de interés”

i *	Mejor solución global	Cambios en la solución óptima con respecto a la solución obtenida con i=10%, de acuerdo a los escenarios de optimización			
		1 aclareo	2 aclareos	3 aclareos	4 aclareos
4	3 aclareos	C	C	NC	C
6	3 aclareos	NC	C	NC	C
8	3 aclareos	NC	C	NC	C
12	2 aclareos	NC	C	C	C
14	2 aclareos	NC	C	C	C

*Tasa de interés

C: cambia el mejor régimen de aclareo, la edad y/o intensidad de los raleos es diferente.

NC: el mejor régimen de aclareo no cambia ante las modificaciones en la tasa de interés.

Cuando la tasa de interés es 12% o 14%, el mejor régimen de aclareos es el que prescribe dos aclareos, mientras que para los demás valores de la tasa de interés que fueron incluidos en el análisis, la solución óptima sigue siendo el régimen con tres aclareos, tal como se puede observar en la columna “Mejor solución global”. Al analizar los diferentes escenarios de aclareo en forma independiente (por número de aclareos), se tiene que cuando se consideran dos o cuatro aclareos los regímenes óptimos son muy sensibles a los cambios en la tasa de interés; en regímenes con un aclareo, la edad y la intensidad del raleo se modifican solamente si la tasa de interés cambia a un valor del 4%; y en el caso de tres aclareos, los regímenes óptimos cambian para tasas de interés del 12% y 14%.

Estos resultados indican que el modelo es sensible a variaciones en la tasa de interés en algunos escenarios de optimización relacionados al número de aclareos, razón por la cual se debe tener cuidado al seleccionar el valor de esta variable cuando se desee aplicar el modelo, pues de acuerdo a su valor, la edad e intensidad de los aclareos cambia.

Variable “Precio de la madera”

En los diferentes escenarios considerados se observó que variaciones en la relación entre los precios de la madera rolliza de diferentes categorías diamétricas afectan la solución

óptima del modelo, esto es, las edades e intensidades de los raleos son distintas a las obtenidas utilizando los precios de la madera originales. El mejor régimen de manejo también cambia, en los tres escenarios muestra un mayor valor actual neto el régimen con dos aclareos.

Variable “Precio del carbono”

Al aumentar el precio de carbono de 10\$ tC⁻¹ a 20 \$ tC⁻¹ y 30 \$ tC⁻¹ la solución óptima del modelo no cambia. Cuando el precio se incrementa a 40 \$ tC⁻¹ solamente el mejor régimen para el escenario que incluye cuatro aclareos se modifica, mientras que si el precio del carbono es 50 \$ tC⁻¹ o más, los regímenes de aclareo cambian en todos los escenarios, las edades de los aclareos se prolongan y en la mayoría de los casos las intensidades son menores; de esta manera, los regímenes que el modelo genera tratan de mantener por más tiempo la madera en pie para secuestrar mayores cantidades de carbono y generar beneficios por este concepto.

En relación al mejor régimen de manejo, este sigue siendo en todos los escenarios el que incluye tres aclareos, sin importar que las edades e intensidades de los raleos se vean alteradas por los cambios en el precio del carbono.

Actualmente el carbono no tiene un precio alto en el mercado, en la mayoría de los trabajos de investigación consultados se maneja un precio entre 10\$ tC⁻¹ y 20\$ tC⁻¹ (Díaz-Balteiro y Rodríguez, 2006; Baskent *et al.*, 2008; Alvarez, 2009). Las cifras altas empleadas en el análisis de sensibilidad solo tienen como fin explorar la magnitud en la que debería aumentar el precio del carbono, para tener un peso considerable en la función objetivo del modelo y ser capaz de modificar la solución óptima.

4.4 Conclusiones

El trabajo de investigación expuesto en este capítulo brinda información sobre los regímenes de aclareo (edades e intensidades de las cortas) que maximizan el valor actual

neto proveniente de la producción de madera y/o el servicio ambiental del secuestro de carbono. El modelo de optimización fue desarrollado para rodales de *Tectona grandis* L.f. (teca) manejados en turnos de 30 años y las soluciones se obtienen mediante Algoritmos Genéticos. No obstante, el modelo puede ser adaptado fácilmente para ser aplicado en plantaciones de otras especies y bajo diferentes condiciones de manejo.

Con los datos utilizados y las condiciones asumidas, el mejor régimen cuando se considera la producción de madera como uno de los objetivos es aquel que prescribe tres aclareos, variando la edad y la intensidad de los mismos de acuerdo a la densidad inicial de plantación (1111 arb ha⁻¹ o 1600 arb ha⁻¹). Cuando el secuestro de carbono es el único objetivo del manejo, el régimen de manejo que genera mayores beneficios es el que no incluye aclareos.

Los resultados mostraron que en la determinación del régimen óptimo de aclareos cuando se consideran dos productos (madera y secuestro de carbono) como objetivo del manejo, la producción de madera prevalece sobre el secuestro de carbono, ya que los altos precios de la madera hacen que esta tenga mayor peso en la función objetivo del modelo; por lo tanto, los mejores regímenes de aclareo son aquellos que maximizan el valor actual neto relacionado a la venta de madera, aunque estos no sean los que originen mayor secuestro de carbono. Por otra parte, cuando se considera solamente el secuestro de carbono en la optimización, es posible aumentar los beneficios obtenidos por este servicio ambiental hasta en un 44,8%, pero los beneficios generados por la producción de madera pueden disminuir en más del 75%, dependiendo del régimen de manejo adoptado. De esta manera, la consecución de un objetivo afecta negativamente la optimización del otro objetivo. Queda a criterio del productor forestal decidir el régimen de aclareos a utilizar de acuerdo a sus intereses.

El análisis de sensibilidad del modelo arrojó que los regímenes de aclareo óptimos se modifican ante cambios en las siguientes variables de entrada: tasa de crecimiento en área basal, tasa de interés y precio de la madera, por lo tanto se debe prestar especial atención a los valores de estas variables para obtener resultados confiables. Por otra

parte, el modelo es poco sensible al costo de corta (costo de extraer 1 m³ de madera), ya que las edades e intensidades de los aclareos se mantienen iguales cuando se hacen cambios en esta variable, sin embargo, si este costo aumenta más del 50% se prefiere un régimen de manejo con dos aclareos. Igualmente el modelo es poco sensible al precio del carbono, si este aumenta hasta en un 200% con respecto al valor original utilizado (10 \$ tC⁻¹) los regímenes óptimos no se ven afectados; pero cuando esta variable se incrementa en más de un 300% los regímenes de aclareo cambian y registran mayor secuestro de carbono, lo que significa que para que valga la pena modificar los regímenes de aclareo en función de secuestrar más carbono, el precio de este debe ser por lo menos 40 \$ tC⁻¹.

El modelo permitió analizar el flujo de carbono en un rodal durante el turno y estimar el carbono almacenado en forma de productos forestales. Bajo los supuestos establecidos en este estudio, se determinó que al momento del turno (30 años) se ha logrado almacenar entre 87,2 y 145,9 tC ha⁻¹ en árboles en pie y en productos forestales, y la tasa de secuestro de carbono varía entre 3,2 y 5,4 tC ha⁻¹año⁻¹ dependiendo del régimen de manejo aplicado y considerando la producción de madera como un objetivo del manejo. Se estimó que el carbono es liberado nuevamente a la atmósfera en un período de 120 años, pero si se considera un plan de replantación a varios turnos, las plantaciones forestales pueden convertirse en sistemas de fijación y almacenamiento continuos de carbono.

Los resultados sugieren que en plantaciones comerciales de teca destinadas a la producción de madera se pueden obtener beneficios adicionales gracias al secuestro de carbono, sin necesidad de aplicar cambios sustanciales en las prácticas de manejo, en este sentido, el modelo desarrollado proporciona una guía acerca del potencial que tiene la teca para secuestrar carbono en su biomasa vegetal y mantenerlo almacenado en productos forestales por largos períodos de tiempo. Por el contrario, si el fin primordial de la plantación es secuestrar carbono, es necesario implementar regímenes de manejo que favorezcan este objetivo, los cuales evitan la práctica de aclareos, o postergan la edad y disminuyen la intensidad de los mismos, debido a las emisiones que se originan al

extraer parte de la biomasa del rodal. Los regímenes orientados al secuestro de carbono generan menores beneficios económicos relacionados a la producción de madera.

4.5 Referencias

- Álvarez S (2009) *Optimización de la plantación forestal considerando la captura de carbono en bosque de pino-encino en la sierra Suárez, Oaxaca, México*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes. Manuscrito. Madrid, España. 174 pp.
- Backéus S, Wikström P, Lämås T (2005) A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production. *Forest Ecology and Management* 216: 28-40
- Backéus S (2009) *Forest management strategies for CO₂ mitigation*. Swedish University of Agricultural Sciences. Doctoral Thesis. Umeå, Suecia. 47pp.
- Baskent EK, Keles S, Yolasigmaz HA (2008) Comparing multipurpose forest management with timber management, incorporating timber, carbon and oxygen values: A case study. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 105-120.
- Bateman IJ, Lovett AA (2000). Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. *Journal of Environmental Management* 60: 301-323.
- Bridsey R (1992) Carbon storage and accumulation in the United States forest ecosystems. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report WO-59. Washington, EEUU. 51 pp.
- Brown S, Lugo A, Chapman J (1986) Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 390-394.
- Brown S, Hall C, Knabe W, Raich J, Trexler M, Woomer P (1993) Tropical forest: their past, present and potential future role in the terrestrial carbon budget. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 71-94.

- Chen BW, Gadov vK (2008) Combining spatial and other objectives in forest design. *Forestry Studies* 48: 30–40.
- Cubero J, Rojas S (1999) *Fijación de carbono en plantaciones de melina (Gmelina arborea Roxb.), teca (Tectona grandis L.f.) y pochote (Bombacopsis quinata Jacq.) en los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. Tesis Licenciatura en Ciencias Forestales. Escuela de Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 95 pp.
- Díaz-Balteiro L, Rodríguez L (2006) optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration – A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management* 229: 247 – 258.
- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski J (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- EcoBosques (s/f). *La teca como sumidero de CO₂*. [documento en línea]. Disponible desde Internet en: www.ecobosques.com/Pdfs/Estudiocaptacion.pdf. [con acceso el 20-04-12].
- Franquis FR, Infante AM (2003) Los bosques y su importancia para el suministro de servicios ambientales. *Revista Forestal Latinoamericana* 34: 17-30.
- Hille M, Hessenmöller D, Möhring B, Gadov Kv (1999) Evaluating alternative silvicultural regimes in a 110-year old beech forest. Provisional Proceedings “From Theory to Practice – Gaps and Solutions in Managerial Economics and Accountings in Forestry”. Praga, República Checa. pp 94-100.
- Hoen HF, Solberg B (1994) Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science* 40: 429-351.
- IPCC (1996) *Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories*. Ciudad de México, 11-13 Septiembre 1996.
- IPCC (2000) *Special Report: land use, land-use change and forestry. Summary for policymakers*. Ginebra, Suiza. 24 pp.

- IPCC (2005) *Orientación de buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Programa del IPCC sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Publicado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para el IPCC. Ginebra, Suiza.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HM (eds.). Cambridge University Press. Reino Unido. 996 pp.
- Jordan C (1983) Productivity of tropical rain forest ecosystems and the implications for their use as future wood and energy sources. In: *Tropical rain forest ecosystem: structure and functions*. Ecosystems of the world 14^a. Elsevier. Nueva York, EEUU. 117-136 pp.
- Kaipanen T, Liski J, Pussinen A, Karjalainen T (2004) Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science and Policy* 7: 205-219.
- Karjalainen T (1996) Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climatic conditions. *Forest Ecology and Management* 8: 113-132.
- Keles S, Baskent EZ (2007) Modeling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: A case study. *Polish Journal of Environmental Studies* 16: 473-479.
- Kraenzel M, Castillo A, Moore T, Potvin C (2003) Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panamá. *Forest Ecology and Management* 173: 213-225.
- Liski J, Pussinen A, Pingoud K, Mäkipää T, Karjalainen T (2001) Which rotation is favorable for carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* 31:2004-2013.
- Lopera GJ, Gutiérrez VH (2001) *Flujo de carbono y respuesta a diferentes estrategias de manejo en plantaciones tropicales de Pinus Patula*. Simposio Internacional de medición

- y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 18-20 de octubre de 2001. Valdivia, Chile. 20 pp.
- Mäkipää T, Karjalainen T, Pussinen A, Kukkola M (1998) Effects of nitrogen fertilization on carbon accumulation in boreal forests: modelo computations compared with results of long-term fertilization experiments. *Chemosphere* 36: 1155-1160.
- McCarney GR, Armstrong GW, Adamowicz WL (2006) Implications of a market for carbon on timber and non-timber values in an uncertain world. Select paper prepared for presantion at the Canadian Agricultural Economics Society Annual Meeting, Montreal, Quebec, May 25-28, 2006. [documento en línea]. Disponible desde Internet en: ageconsearch.umn.edu/bitstream/34175/1/sp06mc01.pdf
- Microsoft Corporation (2012) *Microsoft Visual Studio 2010*. [documento en línea]. Disponible desde Internet en: <http://msdn.microsoft.com/query/dev10.query?appId=Dev10IDEF1&l=ES-ES&k=k%28MSDNSTART%29&rd=true> [con acceso el 8-01-2012].
- Montoya G, Soto L, De Jong B, Nelson K, Farias P, Yakactic P, Taylor J, Tipper R (1995). *Desarrollo Forestal Sustentable: Captura de Carbono en las Zonas Tzeltal y Tojolabal del Estado de Chiapas*. Instituto Nacional de Ecología. México. 50 p.
- Moret AY, Jerez M, Mora A (1998) Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis L.*) en la unidad experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas – Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42(1): 41-50.
- Murillo O, Badilla Y, Rojas F (2011) *Calidad de las plantaciones de teca en Costa Rica. Conferencia internacional de Teca*. Costa Rica. [documento en línea]. Disponible en Internet en: web.catie.ac.cr/conferencia_teca/presentaciones/Sesion_6_3.pdf [con acceso el 05-01-2012].
- Nabuurs GJ, Mohren GMJ (1993) *Carbon fixation through forestation activities: a study of the carbon sequestering potential of selected forest types*. Institute for Forestry and Nature Research IBN-DLO, IBN Research Report 93/4. Wageningen, Países Bajos. 205 pp.

- Nepal P, Grala RK, Grebner DL (2012) Finalcial feasibility iof increasing carbon sequestration in harvestes wood products in Mississippi. *Forest Policy and Economics* 20: 16-24.
- Ordoñez JAB , Maser O (2001) Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12.
- Osorio O. 1997. *Regímenes de espesura y sus efectos en la rentabilidad de teca (Tectona grandis L.f) en Caparo, Venezuela*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 98 pp.
- Pérez LD, Kanninen M (2005) Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 210: 425-441.
- Pohjola J, Valsta L (2007) Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics* 9: 789-798.
- Pussinen A, Karjalainen T, Mäkipää T, Valsta L, Kellomäki S (2002). Forest carbon sequestration and harvests in relation to applied rotation lengths under different climate and nitrogen deposition scenarios. *Forest Ecology and Management* 158: 103-115.
- Raymer AK, Gobakken T, Solberg B, Hoen HF, Bergseng E (2009) A forest optimisation model inclusion carbon flows: Application to a forest in Norway. *Forest Ecology and Management* 258: 579-589.
- Read D, Cannell M, Cox P, Curran P, Grace J, Ineson P, Jarvis PG, Malhi Y, Powlson D, Shepherd J, Woodward I (2001). The role of land carbon sinks in mitigating global climate change. The Royal Society. *Policy Documents* 10(1): 1- 27.
- Seo JH, Vilčko F, Sánchez S, Kunth S, Son YM, Von Gadow K (2005) A case study of forest management planning using a new heuristic algorithm. *Tree Physiology* 25: 929-938.
- Thornley JHM, Cannell MGR (2000) Managing forests for wood yield and carbon storage: a theoretical study. *Tree Physiology* 20: 477-484.
- Zambrano T (1993) *Modelo preliminar de simulación del crecimiento en área basal para la teca (Tectona grandis Linn)*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de

Ciencias Forestales, Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Mérida, Venezuela.
147pp.

Zambrano T, Suárez M, Jerez M (2001) Evaluación de la efectividad del ajuste de algunos modelos de regresión utilizados para estimar la relación altura-diámetro en parcelas permanentes de rendimiento y aclareo en teca (*Tectona grandis* Linn). *Revista Forestal Venezolana* 45(2): 163-173.

CAPÍTULO V

MODELO DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA PARA LA PLANIFICACIÓN DEL MANEJO EN PLANTACIONES FORESTALES, INCLUYENDO PRODUCCIÓN DE MADERA Y SECUESTRO DE CARBONO

5.1 Introducción

La planificación del manejo en una plantación forestal es un proceso mediante el cual se toman decisiones relacionadas a los tratamientos silviculturales que se aplicarán durante la vida de la masa forestal, las áreas que serán aprovechadas durante el horizonte de planificación, los volúmenes a cosechar y los productos a obtener. En situaciones en las que se requieren patrones anuales estables de cosechas o ingresos, y cuando se tienen objetivos y restricciones globales que deben cumplirse (ej. demanda de madera que se desea satisfacer), la planificación se realiza a nivel de bosque, considerando a la plantación como una entidad única compuesta de un conjunto de compartimientos o rodales. La vía para implementar la planificación a nivel de bosque es un documento conocido como plan de cortas o plan de aprovechamiento, que contiene un listado de los rodales que deben ser cortados durante cada año de un período de planificación. Las características operativas del bosque, tales como volúmenes de cosecha anual, flujos de caja, edad de los árboles en pie, entre otras, y la estructura del bosque al final de período de planificación son consecuencias directas del plan de aprovechamiento (Clutter *et al.*, 1983). De esta manera, el diseño de planes de manejo incluye la elaboración de un programa de cortas, el cual indica cuándo, dónde y cuánta madera cortar para satisfacer los objetivos establecidos, haciendo un uso adecuado de los recursos disponibles.

Durante el proceso de planificación es necesario evaluar diferentes opciones de manejo para cada uno de los rodales que conforman la plantación. Cuando las plantaciones forestales tienen fines industriales la evaluación se realiza desde el punto de vista financiero. No obstante, la comparación de las alternativas de decisión puede hacerse en

función de otros beneficios de los bosques, tales como la conservación de la biodiversidad, conservación de los suelos, secuestro de carbono, recreación y esparcimiento (Bettinger y Chung, 2004). En cualquiera de los casos, es muy difícil o casi imposible identificar de manera exhaustiva todos los posibles planes que pueden implementarse, todas las combinaciones de opciones de manejo en cada rodal, y valorar su impacto sobre los objetivos fijados. En este sentido, son de gran utilidad los modelos de optimización ya que estos permiten encontrar el mejor plan de acuerdo a los lineamientos establecidos y las restricciones impuestas.

En la década de los 60 se comenzaron a desarrollar modelos de optimización basados en programación matemática como sistemas de apoyo para la planificar el manejo forestal, principalmente modelos de Programación Lineal. Esta ha sido una de las técnicas más utilizadas para solucionar problemas de planificación a nivel de bosque, principalmente para asignar actividades y recursos en áreas forestales extensas y sobre períodos de tiempo largos (Bettinger *et al.*, 2009a). También se ha empleado Programación Entera, Programación Entera Mixta y Programación Entera Binaria, que son técnicas derivadas de la Programación Lineal diseñadas para tratar modelos en los que las variables de decisión son enteras, y la Programación por Metas en problemas que tienen más de un objetivo en la optimización. En la mayoría de las aplicaciones de la Programación Lineal y sus variantes, se busca la maximización de los beneficios del bosque, mediante la asignación de un régimen de manejo a cada uno de los rodales o compartimientos que lo conforma, el cual se selecciona entre un conjunto de alternativas definidas previamente.

Con el transcurrir del tiempo los procesos de toma de decisiones en la planificación del manejo forestal se han hecho más complejos, debido a la incorporación de nuevos objetivos y los avances en las tecnologías de la información; esto ha traído consigo un cambio en las estrategias de solución de los modelos. Aunque las técnicas de programación matemática clásicas aún se utilizan para resolver algunos problemas de planificación del manejo forestal, la tendencia es emplear técnicas heurísticas, ya que éstas permiten manejar de manera más eficiente la complejidad de los modelos (Bettinger

y Chung, 2004, Pukkala y Kurttila, 2005; Liu *et al.*, 2006). Esta complejidad está asociada al uso de ecuaciones no lineales para modelar el comportamiento de una masa forestal, la inclusión de aspectos espaciales en los modelos, un número elevado de variables y restricciones, y la optimización de varios objetivos de manera simultánea (Bettinger *et al.*, 2009b).

Entre los diversos objetivos que se han incorporado en los modelos de planificación del manejo forestal en los últimos años se encuentra el secuestro de carbono, debido al importante papel que juegan los bosques, ya sean naturales o plantaciones, en la reducción de las cantidades de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, principal gas de efecto invernadero que influye en el calentamiento del planeta. El Protocolo de Kioto firmado en 1997 en el marco de las Naciones Unidas, como un acuerdo internacional para reducir las emisiones de CO₂, reconoció la importancia de los bosques y el manejo forestal para controlar las concentraciones de este gas de efecto invernadero en la atmósfera. Para promover la disminución de las emisiones de CO₂, se han establecido diversos programas de pago que ofrecen incentivos monetarios a aquellos productores forestales que manejen sus bosques con el fin de incrementar el secuestro de carbono, como por ejemplo la Bolsa Climática Europea (European Climate Exchange, ECX), Intercontinental Exchange (ICE), Bolsa Climática de Chicago (Chicago Climate Exchange, CCX), BlueNext, entre otros. Hay diferentes tipos de proyectos forestales que son elegibles para los pagos de carbono, algunos son el establecimiento de nuevas plantaciones, el manejo de bosques existentes con el objetivo de secuestrar carbono, y la obtención de productos forestales de larga vida (Nepal *et al.*, 2012).

La adopción del Protocolo de Kioto y la existencia de los mercados de carbono están obligando a la comunidad científica a trabajar en la estimación de las cantidades de CO₂ que los ecosistemas forestales son capaces de secuestrar, y a los gestores forestales a considerar la fijación de carbono como un nuevo objetivo en el manejo silvicultural (Pérez *et al.*, 2007). Recientemente se han desarrollado investigaciones que integran el secuestro de carbono en los modelos de planificación del manejo forestal, pueden citarse los

trabajos de Hoen y Solberg (1994), Díaz-Balteiro y Romero (2003), Backéus *et al.* (2005), Díaz-Balteiro y Rodríguez (2006), Pohjola y Valsta (2007), Keles y Baskent (2007), Baskent *et al.* (2008), Raymer *et al.* (2009), Cao *et al.* (2010). Estos autores coinciden en la importancia de continuar estudiando la interacción entre los regímenes de manejo aplicados y la fijación del carbono en los bosques.

En este trabajo se propone un modelo de optimización para la planificación del manejo forestal en una plantación de *Tectona grandis* L.f. conformada por múltiples rodales, el cual genera un plan de cortas que indica cuáles rodales cortar y a qué intensidad en cada año del período de planificación. El objetivo es maximizar los beneficios obtenidos de la plantación, en términos del valor actual neto (VAN) del flujo de caja que se origina debido a la producción de madera. Adicionalmente, permite incluir el secuestro de carbono como otro objetivo de la plantación, y encuentra soluciones óptimas cuando se asigna un valor monetario al secuestro de carbono y se suma a los ingresos obtenidos por la producción de madera. De esta manera, el modelo tiene dos objetivos de optimización, producción de madera y secuestro de carbono.

El modelo integra dos niveles de planificación: nivel rodal y nivel bosque. Hace uso de los modelos de aclareos expuestos en los capítulos III y IV (modelos a nivel de rodal), para generar las mejores alternativas de manejo. Luego, mediante una optimización a nivel de bosque, selecciona entre esas alternativas el régimen de aclareo que debe aplicarse en cada uno de los rodales y determina la edad de la corta final, con el fin de maximizar los beneficios globales y satisfacer las restricciones impuestas a nivel de la plantación. Este modelo es uno de los pocos que integran los dos niveles de planificación. La literatura a nivel internacional reporta escasas investigaciones al respecto (Seo *et al.*, 2005; Raymer *et al.*, 2009), por tal razón se considera un aporte importante en este particular.

Para resolver el modelo se utilizaron técnicas heurísticas. El modelo de aclareos a nivel de rodal busca los mejores regímenes mediante un Algoritmo Genético, tal como se explicó detalladamente en los capítulos III y IV. Por su parte, el modelo de aprovechamiento a nivel de bosque incorpora un algoritmo de Recocido Simulado para encontrar el plan de

cortas óptimo para la plantación. En el capítulo II se exploró el desempeño de las heurísticas Recocido Simulado, Algoritmos Genéticos y Búsqueda Tabú para resolver un problema de planificación del aprovechamiento en múltiples rodales, siendo las dos primeras las que presentaron un comportamiento más satisfactorio. Con base en estos resultados, se seleccionaron los métodos heurísticos a emplear.

En el modelo desarrollado se utiliza un enfoque que hasta ahora no ha sido aplicado en el manejo de plantaciones forestales en Venezuela, ya que los modelos de optimización para la planificación del manejo son poco empleados en el país. En lo que se refiere a la especie considerada en este estudio, *Tectona grandis* L.f (teca), aunque existen algunos trabajos orientados a determinar programas de manejo adecuados, no se dispone de modelos de optimización que faciliten esta labor. En relación al secuestro de carbono, se han realizado algunas investigaciones que estiman las cantidades de carbono almacenado en plantaciones de teca (Cubero y Rojas, 1999; Kraenzel *et al.*, 2003; Gera *et al.*, 2011; Ecobosques s/f), pero en ninguna se ha considerado el secuestro de carbono como otro objetivo del manejo.

Para ilustrar la utilidad del modelo, este se aplica a una plantación hipotética de teca de 10000 hectáreas, dispuesta en 200 rodales de igual superficie y forma, y se asumen condiciones de crecimiento similares a las observadas en plantaciones de teca de las Reservas Forestales de Caparo y Ticoporo, Estado Barinas, Venezuela. Con la finalidad de realizar comparaciones, el modelo se utiliza en tres escenarios: a) producción de madera como único objetivo del manejo; b) dos objetivos de manejo, producción de madera y secuestro de carbono; y c) secuestro de carbono como único objetivo del manejo. En cada caso se obtienen los programas de corta óptimos y otra información relacionada, como el valor actual neto del plan de cortas, el turno promedio, los volúmenes cosechados y el flujo de carbono en la plantación.

El modelo desarrollado en este trabajo puede facilitar la planificación del manejo forestal mediante la generación de programas de cortas que maximizan los beneficios, y además ayuda a comprender la interacción entre la producción de madera y el secuestro de

carbono en plantaciones de teca. El modelo constituye una base sobre la cual se puede trabajar para desarrollar aplicaciones futuras adaptadas a otras situaciones particulares del manejo forestal.

5.2 Materiales y métodos

5.2.1 Descripción del problema

El problema objeto de esta investigación consiste en la planificación de un sistema de cortas, para una unidad de producción forestal conformada por cierto número de rodales de una misma especie. Cada rodal tiene características propias, como la densidad inicial de plantación, la calidad de sitio definida en función del área basal potencial, año de plantación y tasa de crecimiento. Se requiere asignar a cada rodal un régimen de aclareo y definir el año en que se realiza la corta final, de tal manera que se maximicen los beneficios económicos obtenidos por la producción de madera y el secuestro de carbono, mientras se satisface una cuota anual de producción de madera.

Para calcular los beneficios se considera que se pueden obtener ingresos anuales por la venta de madera y por el servicio ambiental del secuestro de carbono, y se toman en cuenta los costos operativos, tales como costos de establecimiento, costos de mantenimiento, costo de efectuar una corta y costo de transporte. Para cumplir con la cuota de producción anual es posible realizar cortas en varios rodales en un mismo año, la madera aprovechada puede ser extraída en los aclareos o en la corta total de algunos rodales, de acuerdo a los volúmenes disponibles. Asimismo, se debe lograr la mayor concentración de las operaciones de corta en rodales cercanos con el objetivo de evitar los costos por movimiento de maquinaria.

El objetivo fue desarrollar un modelo basado en optimización heurística que permita determinar un plan de cortas óptimo para un período de planificación determinado, que indique cuáles rodales se deben cortar cada año y en qué intensidad, bajo las consideraciones antes señaladas.

5.2.2 Estructura y funcionamiento del modelo

El modelo busca un plan de manejo óptimo para un conjunto de rodales de una plantación, el cual incluye un régimen de aclareo para cada rodal y la programación de la corta final. Para ello, el modelo está conformado por dos sub-modelos, uno corresponde a un modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareos en un rodal, y el otro es un modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación.

Sub-modelo 1. Modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo en un rodal.

Este sub-modelo se encarga de encontrar los mejores regímenes de aclareo para un rodal, tomando en cuenta la calidad de sitio y la densidad inicial de plantación. La función objetivo del modelo es la maximización de los beneficios económicos obtenidos del rodal debido a la producción de madera y/o el secuestro de carbono, expresados en términos del valor actual neto (VAN). Es posible elegir cuáles productos se van a incluir en el modelo. Si la producción de madera es el único objetivo, se pueden utilizar los modelos de aclareos descritos en los capítulos III y IV (seleccionando madera como producto), y si se incluye el secuestro de carbono, el modelo de aclareo correspondiente es el desarrollado en el capítulo IV. Los supuestos, las ecuaciones de crecimiento, las técnicas de solución y los modelos matemáticos son exactamente los mismos que se detallan en los capítulos antes mencionados.

El modelo de aclareos se debe ejecutar varias veces, eligiendo en cada corrida el número de aclareos deseado. El objetivo es encontrar varios “buenos regímenes de aclareo” para cada rodal de la plantación, es decir, aquellos que permiten obtener los mejores valores para la función objetivo. Los regímenes obtenidos se utilizan como entrada del sub-modelo 2, pues conforman un conjunto de programas de aclareo alternativos entre los cuales el modelo de aprovechamiento a nivel de bosque puede elegir.

Sub-modelo 2. Modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación

Se encarga de buscar la secuencia de cortas óptima para la plantación, que indica año a año los rodales que deben ser aclareados y los que deben ser sometidos a la corta final, teniendo como objetivo la maximización de los beneficios económicos, expresado como el valor actual neto (VAN) de los flujos de caja que ocurren durante el período de planificación y que están asociados a los productos obtenidos. Al igual que en el sub-modelo 1, es posible elegir cuáles productos de la plantación se considerarán en el análisis, madera y/o secuestro de carbono. En la función objetivo se toman en cuenta los ingresos por concepto de producción de madera rolliza, los ingresos por secuestro de carbono, los costos de establecimiento y mantenimiento, costo de corta y costo de transporte. Además, se incluye un índice espacial que busca concentrar las operaciones anuales de corta en rodales cercanos, con el fin de reducir los costos de movimiento de maquinaria y equipos. El modelo considera restricciones relacionadas a la cuota anual de producción de madera, la cual puede variar año a año.

Para determinar los beneficios obtenidos por el secuestro de carbono, se asumió un pago anual por este servicio ambiental. Para ello, se calcula en cada año del período de planificación el balance de carbono en todos los rodales (secuestro - emisiones), si este es positivo en un año determinado, se reciben ingresos de acuerdo al precio del carbono fijado, mientras que un flujo de carbono negativo se penaliza usando el mismo valor del precio de carbono. El balance de carbono es positivo cuando el carbono secuestrado por la biomasa es mayor a las emisiones producidas, en caso contrario el balance de carbono es negativo. Este enfoque es similar al utilizado por Backéus *et al.* (2005), Díaz- Balteiro y Rodríguez (2006), y Baskent *et al.* (2008) en sus modelos, para asignar un valor monetario al secuestro de carbono.

El sub-modelo 2 incorpora un algoritmo de optimización basado en la técnica heurística de Recocido Simulado, el cual a partir de un conjunto de datos de entrada tales como variables financieras, datos sobre los rodales y el listado de los regímenes de aclareo alternativos, determina la mejor solución. Para definir una solución es necesario asignar

a cada rodal un régimen de aclareo (seleccionado entre las alternativas disponibles) y la edad de la corta final.

El algoritmo genera y evalúa múltiples soluciones de manera sistemática según los procedimientos propios de la técnica de Recocido Simulado, los cuales se detallan en el capítulo II. Para evaluar una solución, el modelo de aprovechamiento se apoya en el modelo de crecimiento y rendimiento utilizado también en los capítulos previos, el cual estima el desarrollo de cada rodal de la plantación (área basal, densidad, volumen) de acuerdo al régimen de manejo que le fue asignado, esto permite calcular el volumen total aprovechado en cada año, determinar el cumplimiento de la cuota de producción fijada, y a partir de los datos financieros calcular el valor de la función objetivo.

Si el secuestro de carbono se incluye como un producto de la plantación, el modelo hace estimaciones sobre las cantidades de carbono fijadas en la biomasa (aérea y subterránea) y almacenadas en productos forestales, así como también calcula las emisiones debidas a la descomposición de los desechos de las cosechas y la desintegración de los productos forestales obtenidos. Para calcular la fijación y las emisiones de carbono se sigue el enfoque propuesto por Hoen y Solberg (1994), utilizado también en el capítulo IV. El modelo tiene un módulo que calcula el secuestro neto de carbono en cada rodal, y a partir de este, el secuestro de carbono para toda la plantación.

En la Figura 5.1 se muestra un diagrama que ilustra el funcionamiento del modelo de planificación del manejo forestal y la relación entre sus sub-modelos y módulos.

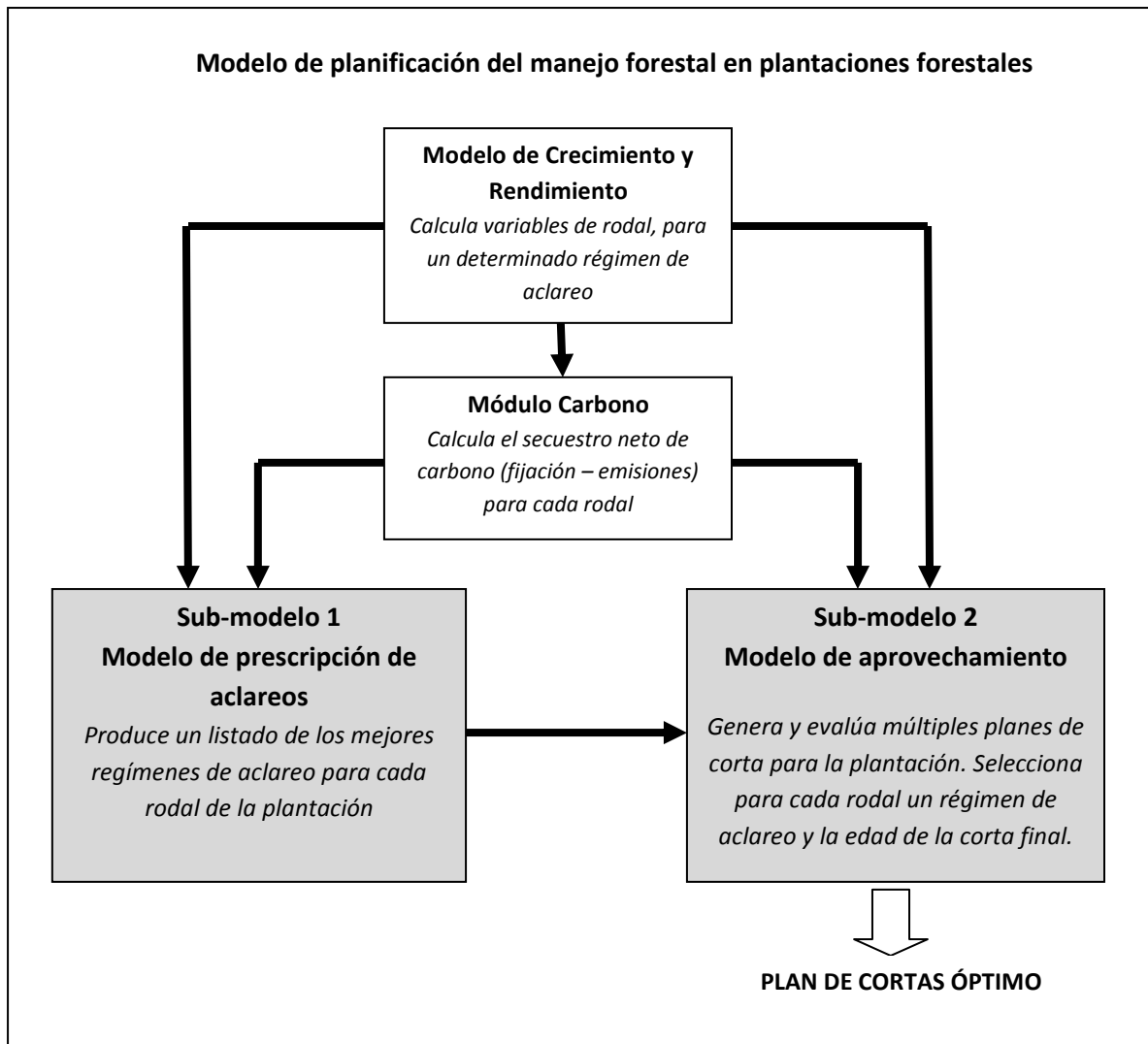


Figura 5.1. Diagrama de funcionamiento del modelo de planificación del manejo forestal

5.2.3 Modelo matemático

5.2.3.1 Sub-modelo 1 (modelo para prescribir regímenes de aclareo en un rodal)

Para el problema de prescripción de aclareos en un rodal se propone un modelo de optimización restringida que utiliza variables enteras para representar la edad de los

aclareos y variables reales para las intensidades de los mismos. La función objetivo y las restricciones se especifican en los capítulos III (Sección 3.2.4) y IV (Sección 4.2.3).

5.2.3.2 Sub-modelo 2 (modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación)

Se plantea como un modelo de optimización restringida, con variables binarias y relaciones funcionales no lineales que se derivan de las ecuaciones de crecimiento y rendimiento utilizadas. Las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones del modelo se detallan en los siguientes apartados.

Variables de decisión

Se definen de la siguiente manera:

X_{ij} : variable binaria que vale 1 si se le asigna al rodal i el régimen de manejo j , en caso contrario es igual a 0.

Un régimen de manejo j incluye un programa de aclareos y el año de la corta final. Las edades e intensidades de los raleos son determinadas por el sub-modelo 1 (modelo para prescribir aclareos, capítulos III y IV), y para la edad de la corta final se define un rango de posibles valores, el cual depende del año de plantación del rodal y de la edad en que se realiza el último aclareo. Se asume que este debe hacerse por lo menos tres años antes de la corta final.

Función objetivo

Está relacionada al valor actual neto de los flujos de caja asociados a la producción de madera (VAN_{madera}) y el secuestro de carbono ($VAN_{carbono}$). Además se incorpora un índice espacial (IE), que tiene como finalidad lograr agregación en las operaciones forestales, de tal manera que los rodales a cortar en un momento determinado estén lo más cerca posible. La función objetivo del modelo es la siguiente:

$$\text{Maximizar } F = VAN_{madera} + VAN_{carbono} + IE \quad [5.1]$$

Cálculo del VAN_{madera} :

El VAN_{madera} es el valor actual neto de los flujos de caja ocurridos durante el período de planificación relacionados con la madera extraída de los aclareos y la corta final en cada rodal. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$VAN_{madera} = \sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^a X_{ij} \left(\frac{\text{Ingreso}_{ijk} - \text{Costo}_{ijk}}{(1+r)^k} \right) \quad [5.2]$$

donde:

nr : número de rodales.

m_i : cantidad de regímenes de manejo alternativos para el rodal i .

a : número de años que incluye el período de planificación.

Ingreso_{ijk} : ingresos obtenidos por la venta de madera extraída del rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j . Se calcula multiplicando el volumen extraído por el precio del metro cúbico de madera, el cual varía dependiendo del diámetro medio de la madera rolliza obtenida.

Costo_{ijk} : costos en los que se incurre el rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j . Incluye costo de corta que varía de acuerdo al volumen extraído, costo de establecimiento y mantenimiento del rodal, y costo de transporte de la madera.

r : tasa de interés.

Cálculo del $VAN_{carbono}$:

El $VAN_{carbono}$ se refiere al valor actual neto de los flujos de caja que ocurren debido al secuestro de carbono. El secuestro neto de carbono se calcula para cada rodal según el régimen de manejo aplicado, y se asigna un precio en dólares estadounidenses por tonelada de carbono secuestrado.

$$VAN_{carbono} = P_c \sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{m_i} \sum_{k=1}^{Td} X_{ij} \left(\frac{F_{ijk} - E_{ijk}}{(1+r)^k} \right) \quad [5.3]$$

donde:

P_c : precio del secuestro de carbono (\$ tC⁻¹).

nr : número de rodales.

m_i : cantidad de regímenes de manejo alternativos para el rodal i .

Td : tiempo (años) al cual se ha descompuesto el 90% del carbono del producto con mayor tiempo de vida orgánico.

F_{ijk} : carbono fijado en el rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j (tC).

E_{ijk} : carbono emitido por el rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j (tC).

r : tasa de interés.

El carbono fijado en la biomasa de un rodal en un año determinado, así como las emisiones debido a la descomposición de los residuos de las cosechas, madera muerta y productos forestales se calculan de la misma manera que en el modelo para prescribir regímenes de aclareo del capítulo IV (ecuaciones 4.10 - 4.16), según el enfoque propuesto por Hoen y Solberg (1994).

Cálculo de IE:

Se calcula un índice espacial para cada año k del período de planificación (IE_k), el cual es inversamente proporcional a la distancia entre los rodales a aprovechar ese año. Luego, se suman los índices de todos los años y se obtiene el índice espacial para un programa de cortas (IE). Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$IE_k = \sum_{i=1}^{nr} \sum_{w=1}^{nr} \frac{R_{iwk}}{d_{iw}} \quad \text{para } i \neq w \quad [5.4]$$

$$IE = P_{ie} \sum_{k=1}^a IE_k \quad [5.5]$$

donde:

IE_k : índice espacial correspondiente al año k .

P_{ie} : peso o penalidad que se impone al índice espacial para equilibrar su valor con el VAN_{madera} y el $VAN_{carbono}$ en la función objetivo.

nr : número de rodales.

a : número de años que incluye el período de planificación.

R_{iwk} : es una variable binaria que vale 1 si los rodales i y w se cortan en el año k , y es igual a 0 en otros casos.

d_{iw} : distancia entre el rodal i y el rodal w .

Restricciones

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^{nr} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} VE_{ijk} \geq CP_k \quad k = 1, 2, \dots, a \quad [5.6]$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, nr \quad [5.7]$$

$$X_{ij} = (0, 1) \quad i = 1, 2, \dots, nr \quad j = 1, 2, \dots, m_i \quad [5.8]$$

donde:

nr : número de rodales.

m_i : cantidad de regímenes de manejo alternativos para el rodal i .

a : número de años que incluye el período de planificación.

VE_{ijk} : volumen extraído del rodal i , en el año k , si se aplica el régimen de manejo j .

CP_k : cuota de producción de madera para el año k .

Las restricciones [5.6] se refieren al cumplimiento de la cuota de producción anual de madera, para cada año del período de planificación hay una restricción; las restricciones [5.7] indican que a un rodal solamente se le puede asignar un régimen de manejo; y las restricciones [5.8] señalan que las variables de decisión son binarias.

5.2.4 Técnica de optimización utilizada para resolver el modelo

5.2.4.1 Sub-modelo 1 (modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo)

Se utilizó la técnica heurística Algoritmos Genéticos para determinar el régimen de aclareos óptimo para un rodal, a partir de la densidad inicial, calidad de sitio, datos financieros (costos, precios de los productos, tasa de interés) y de acuerdo a los productos considerados en el manejo (madera y/o secuestro de carbono). Los detalles del algoritmo diseñado se encuentran en los capítulos III (Sección 3.2.5) y IV (Sección 4.2.4).

5.2.4.2 Sub-modelo 2 (modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación)

En este sub-modelo se empleó la técnica heurística Recocido Simulado para buscar los mejores planes de manejo para la plantación, ya que las variables de decisión del modelo son binarias y se incluyen ecuaciones no lineales, lo que dificulta resolverlo mediante técnicas clásicas de programación matemática. El Recocido Simulado consiste en un algoritmo de búsqueda para problemas de optimización global que encuentra el valor óptimo de una función (o uno muy cercano a este) en un espacio de soluciones grande, se basa en la búsqueda de soluciones vecinas y una función probabilística para aceptar una solución (Dréo *et al.*, 2006). Ha sido utilizada con éxito en muchos problemas de planificación forestal, sus fundamentos se explican con detalle en el capítulo II.

Para resolver un problema de optimización con Recocido Simulado, es necesario definir las estrategias de diseño del algoritmo que se utilizarán para: representar una solución, generar la solución inicial, definir un criterio de parada, generar soluciones vecinas, definir la función de evaluación y la curva de enfriamiento (tasa de disminución de la temperatura, parámetro del algoritmo de Recocido Simulado).

Representación de una solución

Se hizo mediante una matriz de variables binarias, cuyo número de filas es igual al número de rodales, y el número de columnas corresponde al número máximo de alternativas de manejo ($m = \text{Max}(m_i)$). En cada elemento de la matriz se almacena una variable binaria X_{ij} , que indica si al rodal i se le asigna o no el régimen de manejo j . En la Figura 5.2 se muestra un ejemplo, cada fila de la matriz representa un rodal, en una fila debe haber solamente un elemento con valor 1, el cual debe estar en la columna correspondiente al régimen de manejo que le fue asignado a ese rodal, los demás elementos de la fila deben ser iguales a cero. Por ejemplo, en la Figura 5.3 al rodal 5 se le asigna el régimen de manejo 2.

	1	2	3	4	5	...	m
1	0	0	1	0	0	...	0
2	1	0	0	0	0	...	0
3	1	0	0	0	0	...	0
4	0	0	0	0	0	...	1
5	0	1	0	0	0	...	0
.							
.							
.							
nr	0	0	0	0	1	...	0

nr : número de rodales

m : número máximo de regímenes de manejo alternativos

Figura 5.2. Representación de una solución del problema

Criterio de parada

Se utilizó como criterio de parada un número máximo de iteraciones.

Solución inicial

La solución inicial del algoritmo se generó de manera aleatoria: para cada rodal se elige al azar un régimen de manejo y se le asigna a la variable binaria correspondiente el valor 1 y a las demás variables relacionadas a ese rodal se les asigna 0.

Generación de soluciones vecinas

Para generar una solución vecina de otra solución \mathbf{X} se eligen al azar dos rodales (dos filas) y se cambia en forma aleatoria el régimen de manejo asignado a cada uno de ellos.

Evaluación de una solución

Para medir la calidad de una solución se utilizó una función de evaluación que considera la función objetivo original (ecuación [5.1]) y una penalización por la violación de las restricciones de cuota anual de producción (ecuación [5.6]). De esta manera, las soluciones que violan las restricciones son penalizadas y tienen un peor valor de la función de evaluación que aquellas soluciones que satisfacen las restricciones. La función de evaluación $fE(\mathbf{X})$ está dada por la siguiente ecuación:

$$fE(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}) - P \times VT(\mathbf{X}) \quad [5.9]$$

Donde $f(\mathbf{X})$ es la función objetivo original del problema, P corresponde a la penalización ($\$/\text{m}^3$) que se impone a la violación de las restricciones de cuota anual de producción, y $VT(\mathbf{X})$ es la violación total (en m^3) de las restricciones para una solución \mathbf{X} , la cual se calcula de la siguiente manera:

$$VT(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^a (CP_k - g_k) \times I_k \quad [5.10]$$

Siendo CP_k la cuota de producción fijada para el año k , g_k el valor de la restricción de cuota anual para el año k evaluada en \mathbf{X} , o lo que es igual, el volumen aprovechado en el año k si se aplica el plan de cortas (solución) \mathbf{X} . I_k es una variable indicadora que vale 1 si en el año k se viola la restricción de cuota de producción ($g_k < CP_k$) y en otro caso vale 0.

Curva de enfriamiento y parámetros del algoritmo de Recocido Simulado

Se utilizó la forma exponencial o geométrica para la curva que determina la velocidad de disminución de la temperatura a medida que avanzan las iteraciones del algoritmo:

$$t_{z+1} = \alpha t_z \quad [5.11]$$

Donde t_{z+1} es la temperatura en la iteración $z+1$, t_z es la temperatura en la iteración z y α es una constante cercana a 1, escogida generalmente en el rango de 0,9 a 0,99 (Dréo *et al.*, 2006).

Los parámetros necesarios para ejecutar el algoritmo de Recocido Simulado son temperatura inicial (t_0), tasa de disminución de la temperatura (α) y número de iteraciones en cada nivel de temperatura (n_{it}), todos definidos mediante experimentación.

5.2.5 Implementación del modelo

El modelo se programó en el lenguaje Visual Basic, versión 2010 (Microsoft Corporation, 2012). El programa permite utilizar tanto el modelo de prescripción de aclareos como el modelo de aprovechamiento de la plantación.

5.2.5.1 Programación del sub-modelo 1 (modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo)

En el modelo de aclareos hay dos opciones, la primera de ellas genera el mejor régimen de aclareo para un rodal de acuerdo a los objetivos de manejo, madera y/o secuestro de carbono, es decir, corresponde a los modelos desarrollados en los capítulos III y IV. La segunda opción determina varios regímenes de aclareo para un rodal con ciertas características, permitiendo definir un conjunto de regímenes alternativos. Los datos de entrada de esta opción son calidad de sitio, densidad inicial de plantación, datos financieros (costo de corta, precio de la madera, precio del carbono, tasa de interés),

productos del rodal (madera y/o secuestro de carbono), y el número de regímenes alternativos deseados de acuerdo al número de aclareos, por ejemplo, es posible indicar n_1 regímenes con un aclareo, n_2 regímenes con dos aclareos, n_3 regímenes con tres aclareos y n_4 regímenes con cuatro aclareos. La opción de no aclarear siempre se incluye. La salida es un listado con la cantidad de regímenes de aclareo solicitada, el cual especifica la edad e intensidad de los aclareos para cada régimen alternativo. Esta lista se puede guardar en un archivo de texto. En el Anexo C se muestran las ventanas de entrada y salida de este módulo del programa.

5.2.5.2 Programación del sub-modelo 2 (modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación)

En el modelo de aprovechamiento los datos de entrada son los productos a considerar (madera y/o secuestro de carbono), costo de corta, precio de la madera rolliza, precio del carbono, parámetros del algoritmo de Recocido Simulado, nombre y ubicación de los siguientes archivos de texto:

- Archivo con información de los rodales: acá deben estar guardados el número de identificación, año de plantación, área, calidad de sitio, densidad inicial y ubicación (coordenadas X,Y en un plano cartesiano) de cada rodal. Cada fila del archivo debe corresponder a un rodal (ejemplo en Anexo D).
- Archivo que contiene las alternativas de aclareo para rodales con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y calidad de sitio I.
- Archivo que contiene las alternativas de aclareo para rodales con una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹ y calidad de sitio II.
- Archivo que contiene las alternativas de aclareo para rodales con una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹ y calidad de sitio I.
- Archivo que contiene las alternativas de aclareo para rodales con una densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹ y calidad de sitio II.

Los archivos que contienen las alternativas de aclareo especifican el número de aclareos, edades e intensidades de área basal en que deben hacerse los raleos, cada fila del archivo corresponde a un régimen de aclareo alternativo. Estos archivos son creados por la opción del modelo de prescripción de aclareos que permite generar varios regímenes para un rodal. Para simplificar, se asumió que solamente hay cuatro tipos de rodales, que se obtienen al combinar las opciones de calidad de sitio (I y II) y densidad inicial (1111 y 1600 arb ha⁻¹).

La salida del modelo de aprovechamiento es una tabla que indica para cada rodal de la plantación los años en que se aplica una corta y la intensidad, el valor actual neto de ese programa de corta, el turno promedio, y los volúmenes aprovechados en cada año del período de planificación. Cuando se incluye el secuestro de carbono como objetivo, se muestra también una tabla con los valores de carbono fijado, emisiones y secuestro neto de carbono en la plantación para el período de planificación y para los 100 años siguientes. En el Anexo E se muestran las ventanas de entrada y salida del modelo de aprovechamiento.

Adicionalmente, se diseñó una aplicación en un Sistema de Información Geográfica (ArcGis 9) para visualizar la distribución espacial de los rodales que son cortados en un año. La tabla que contiene los años e intensidades de las cortas para todos los rodales, generada como salida por el modelo de aprovechamiento, se exporta a ArcGis para generar un mapa con la ubicación de los rodales a aprovechar en cualquier año del período de planificación (ejemplo en Anexo F).

5.2.6 Caso de estudio

El modelo se utilizó para generar un plan de manejo para una plantación hipotética de teca de 10000 ha, compuesta de 200 rodales, cada uno con un área de 50 ha. Se asumió una distribución de los rodales en cuadrículas de 500 x 1000 m. Los rodales están ubicados en sitios de calidades I y II, definidas según su área basal potencial (37,5 m²ha⁻¹ para calidad de sitio I y 32 m²ha⁻¹ para calidad de sitio II), y plantados a espaciamientos

2,5 x 2,5 m (1600 arb ha⁻¹) y 3 x 3 m (1111 arb ha⁻¹). Los números de identificación de cada rodal están relacionados al orden en que fueron plantados (Figura 5.3).

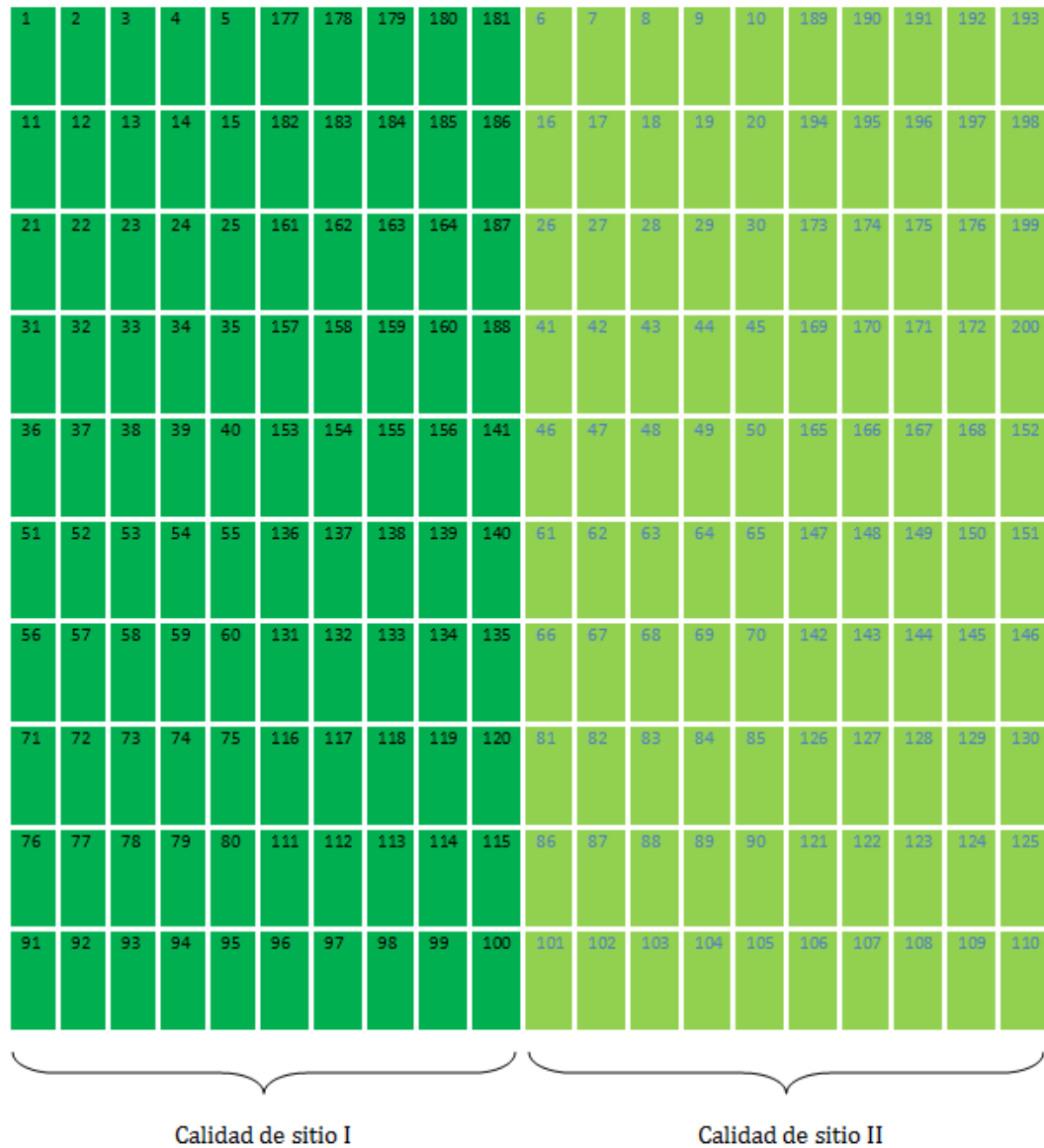


Figura 5.3. Representación de la plantación y disposición de los rodales en el caso de estudio

En este caso de estudio, por tratarse de una plantación hipotética y por simplicidad, se seleccionó la forma, tamaño y disposición de los rodales que se muestran en la Figura 5.3. Sin embargo, en otras aplicaciones se puede utilizar el modelo para planificar el manejo en plantaciones con rodales de dimensiones variables y ubicaciones reales sobre la superficie terrestre.

Período de planificación

El período de planificación es de 40 años. La plantación de los rodales comienza al inicio del período de planificación (año 0) y culmina en el año 10 (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Plan de establecimiento para el caso de estudio

Año	Área a plantar (ha)	No. total de rodales a plantar	No. de rodales a plantar			
			CS I di=1111	CS I di=1600	CS II di=1111	CS II di=1600
0	500	10	3	2	3	2
1	500	10	3	2	3	2
2	500	10	3	2	3	2
3	1000	20	5	5	5	5
4	1000	20	5	5	5	5
5	1000	20	5	5	5	5
6	1000	20	5	5	5	5
7	1000	20	5	5	5	5
8	1100	22	6	5	6	5
9	1200	24	6	6	6	6
10	1200	24	6	6	6	6
TOTAL	10000	200	52	48	52	48

CS: calidad de sitio, di: densidad inicial (arb ha⁻¹)

Turno

Se estableció un turno mínimo de 20 años y un turno máximo de 40 años, correspondiente a la duración del período de planificación, y se asume que en el año 40

deben haberse aprovechado todos los rodales. El modelo determina el turno para cada rodal. No se considera en el modelo la replantación de los rodales.

Cuotas de producción anual

La cuota de producción anual es la cantidad mínima de madera que se debe producir en un año, en este caso de estudio se refiere a madera proveniente de árboles con un diámetro superior a 20 cm. La cuota varía según el año, y las restricciones se aplican a partir del año 7, ya que antes no es posible extraer madera rolliza de esas dimensiones. En la Tabla 5.2 se especifican las cuotas de producción establecidas, la última fila corresponde a la sumatoria de las cuotas de producción de cada año, por lo que representa la cantidad total de madera con diámetro superior a 20 cm que debe extraerse durante todo el período de de planificación.

Tabla 5.2. Cuota de producción anual (madera rolliza con diámetro superior a 20 cm)

Años	Cuota (m³)
7 - 10	5000
11 - 15	10000
16 - 20	20000
21 - 40	60000
Total	1425000

El modelo calcula el volumen extraído en cada año del período de planificación, según el plan de cortas que el algoritmo de optimización genera. El porcentaje de ese volumen que corresponde a madera rolliza con un diámetro superior a 20 cm se obtuvo a partir del trabajo de Osorio (1997) para plantaciones de teca en la Reserva Forestal de Caparo (Tabla 5.3).

Modelo de crecimiento

Se utilizaron los mismos parámetros del modelo de crecimiento empleados en los capítulos III y IV, los cuales varían de acuerdo a la calidad de sitio y a la densidad inicial de plantación (Véase Tabla 3.3, Capítulo III).

Tabla 5.3. Porcentaje del volumen (sin corteza) extraído en una corta que corresponde a madera rolliza con diámetro > 20 cm, según la categoría diamétrica del árbol medio

Categoría diamétrica (cm)	Porcentaje de madera con dap > 20 cm
< 10	0
[10 - 15)	23
[15 - 20)	40
[20 - 24)	55
[25 - 29)	70
[30 - 39)	70
>= 40	70

Datos financieros

Los costos de establecimiento, mantenimiento, corta y el precio de la madera rolliza según categorías de diámetro son los utilizados en los capítulos III y IV (Véase Tablas 3.4 y 3.5, Capítulo III). La tasa de interés usada fue el 10% y el precio del carbono se estableció en 10 \$tC⁻¹, valor que comúnmente se utiliza en estudios financieros que incluyen secuestro de carbono (Álvarez, 2009).

Los costos de transporte dependen de la ubicación de un rodal en relación a un punto fijo, es decir, solo varían en relación a la distancia de los rodales a dicho punto, y se asume que desde ese punto a cualquier otro lugar fuera del área de la plantación el costo de transportar la madera es fijo, independiente de la ubicación de los rodales. Para establecer los costos de transporte se dividió la plantación en cuadrantes, lo cual permitió definir cuatro grupos de transporte, cada uno con un costo asociado en \$ m⁻³ (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Costos de transporte

Grupo de transporte	Costo (\$m ⁻³)
I	2
II	4
III	4,5
IV	6

Corridas del modelo

El modelo se corrió bajo tres escenarios de acuerdo a los objetivos del manejo: a) producción de madera, b) producción de madera y secuestro de carbono considerados conjuntamente, y c) secuestro de carbono. Aunque es poco probable que una plantación de teca sea manejada con la única finalidad de producir carbono, este escenario fue incluido en el análisis con el objetivo de realizar comparaciones. Las corridas del modelo se llevaron a cabo en un computador con procesador modelo Intel(R) Core (TM) 2 Quad de 2.4 GHz, 3 GB de memoria RAM de y disco duro de 465 GB.

El primer paso fue correr el sub-modelo 1, para determinar los regímenes de aclareo alternativos para cada rodal. Se consideraron cuatro tipos de rodales que resultan de combinar las calidades de sitio I y II, y las densidades inicial de 1111 y 1600 arb ha⁻¹. Para cada tipo de rodal y según los productos considerados (madera y/o secuestro de carbono), fue necesario encontrar los regímenes con mayor valor actual neto. En todos los casos se generó un conjunto de alternativas de aclareo conformado por 9 posibles regímenes, incluyendo dos regímenes para 1, 2, 3 y 4 aclareos, y la alternativa de no aclarear. Estos regímenes se almacenaron en cuatro archivos de texto (uno para cada tipo de rodal), cuyos nombres se indican como entrada en el sub-modelo 2.

Posteriormente, se procedió a ejecutar el modelo de aprovechamiento (sub-modelo 2) para los tres escenarios planteados. En cada escenario se determinó el mejor programa de cortas y se calcularon los valores de las variables de salida: VAN (\$), turno promedio

(años), volúmenes aprovechados (m^3), diámetro de la madera aprovechada (cm), flujo de carbono (tC).

Tiempos de computación

Los tiempos de computación empleados para ejecutar los algoritmos heurísticos que buscan la solución del modelo, fueron reportados para los diferentes escenarios de optimización considerados en el caso de estudio. Se registró el tiempo que toma el Algoritmo Genético diseñado (sub-modelo 1) para buscar los 9 mejores regímenes de aclareo para un rodal, considerando que se realizan 100 iteraciones para encontrar cada régimen. Asimismo, se obtuvo el tiempo de cómputo que toma el algoritmo de Recocido Simulado para hallar el plan óptimo de corta para todos los rodales que conforman la plantación, se consideraron 500 iteraciones. El objetivo fue determinar si los tiempos requeridos para efectuar los cálculos son aceptables.

5.2.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad del modelo se hizo para el escenario que considera producción de madera y secuestro de carbono, y se llevó a cabo en tres etapas:

Etapa 1: se estudió la sensibilidad del sub-modelo1, que corresponde al modelo de optimización para prescribir aclareos en un rodal, verificando si las variaciones en los datos de entrada o en los parámetros producen cambios en los regímenes óptimos de aclareo. Esta etapa es equivalente al análisis de sensibilidad realizado en el capítulo IV, en el cual se analizaron las consecuencias de efectuar cambios en la tasa de crecimiento, tasa de interés, costo de corta, precios de la madera rolliza y precio del carbono.

Etapa 2: se analizó la sensibilidad del sub-modelo 2, el cual comprende el modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación. El análisis se realizó tomando en cuenta los resultados de la etapa 1; si el sub-modelo 1 es sensible a los cambios que se efectúan en las variables de entrada, entonces el sub-modelo 2 también lo es, ya que si los

regímenes de aclareo óptimos a nivel de rodal cambian, el plan de cortas óptimo para toda la plantación será distinto, pues las alternativas de manejo contemplan aclareos a edades e intensidades diferentes. En ese caso, no es necesario conducir un análisis de sensibilidad para el sub-modelo 2. Por otra parte, si el modelo de prescripción de aclareos o sub-modelo 1 no es sensible a cambios en una determinada variable o parámetro, se procede a realizar el análisis para el sub-modelo 2. Para ello, se hacen cambios sistemáticos en la variable en estudio y se observa si hay alteraciones en el plan óptimo de cortas. En esta etapa se estudió la sensibilidad del modelo a variaciones en tasa de crecimiento, tasa de interés, costo de corta, precio de la madera y precio del carbono.

Etapa 3: comprende también un análisis de sensibilidad para el sub-modelo 2, pero considera únicamente aquellas variables de entrada que se utilizan en el modelo de planificación del aprovechamiento para la plantación y que no influyen en el sub-modelo 1. Estas variables son costos de transporte y cuotas de producción.

Se realizaron variaciones entre ± 10 y $\pm 50\%$, a intervalos de 10%, en los costos de transporte de manera individual para cada uno de los cuatro grupos de transporte definidos.

Para probar la sensibilidad del modelo ante modificaciones de la cuota de producción anual, se probaron varios escenarios, en cada uno se aumenta o disminuye la cuota de producción fijada para determinados años. En la Tabla 5.5 se indican los cambios realizados en las cuotas de producción.

Tabla 5.5. Escenarios utilizados en el análisis de sensibilidad correspondiente a las cuotas de producción

Años	Valor de ref. (m ³)*	Cuota anual de producción (m ³) para diferentes escenarios							
		Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4	Esc. 5	Esc. 6	Esc. 7	Esc. 8
7-10	5000	10000	5000	5000	5000	-	5000	5000	5000
11-15	10000	10000	20000	10000	10000	10000	5000	10000	10000
16-20	20000	20000	20000	30000	20000	20000	20000	10000	20000
21-40	60000	60000	60000	60000	65000	60000	60000	60000	50000

*Valor de referencia: cuota anual utilizada en las corridas originales
Esc.: escenario.

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Regímenes de aclareo alternativos

Los mejores regímenes de aclareo encontrados por el sub-modelo 1 (modelo de prescripción de aclareos) se presentan en las Tablas 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9. Cada tipo de rodal según su densidad inicial (1111 o 1600 arb ha⁻¹) y calidad de sitio (I, II), tiene asociado un conjunto de regímenes alternativos, los cuales cambian dependiendo de los productos incluidos en el manejo (madera y/o secuestro de carbono). Para los escenarios que incluyen producción de madera, ya sea como único producto o considerado conjuntamente con el secuestro de carbono, los regímenes de aclareo alternativos son los mismos, pues se determinó en el capítulo IV, que al incluir el secuestro de carbono como un objetivo adicional del manejo los regímenes de aclareo óptimos no cambian, si el precio del carbono se mantiene en 10 \$tC⁻¹. Por su parte, cuando el carbono es el único objetivo del manejo, los regímenes de aclareo son diferentes; observándose en general, que los raleos se prescriben a edades más tardías y a intensidades menores.

Tabla 5.6. Mejores regímenes de aclareo obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio I y densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹

Nº de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4
Escenarios: Producción de madera/Producción de madera y secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	8	69,6	-	-	-	-	-	-
1	17	76,0	-	-	-	-	-	-
2	7	47,6	15	53,0	-	-	-	-
2	5	41,8	14	68,4	-	-	-	-
3	5	31,2	9	28,1	21	48,8	-	-
3	11	39,6	17	52,1	20	37,5	-	-
4	5	33,0	12	38,2	17	25,4	25	42,5
4	5	29,5	17	32,3	23	29,6	26	49,5
Escenario: secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	27	43,5	-	-	-	-	-	-
1	27	40,7	-	-	-	-	-	-
2	23	25,1	27	25,8	-	-	-	-
2	23	26,1	27	33,3	-	-	-	-
3	20	25,5	23	28,1	27	43,1	-	-
3	16	26,8	23	25,7	27	70,9	-	-
4	17	32,0	21	30,3	24	45,3	27	30,5
4	15	26,5	20	25,8	25	52,0	27	28,1

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

Tabla 5.7. Mejores regímenes de aclareo obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio I y densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹

Nº de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4
Escenarios: Producción de madera/Producción de madera y secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	9	79,9	-	-	-	-	-	-
1	9	66,2	-	-	-	-	-	-
2	5	55,8	14	53,7	-	-	-	-
2	6	36,0	11	69,1	-	-	-	-
3	5	46,5	10	47,7	19	29,0	-	-
3	5	50,8	11	30,8	16	64,2	-	-
4	8	44,6	16	25,6	20	47,7	25	26,7
4	7	39,2	11	25,7	17	61,7	20	28,5
Escenario: secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	27	27,9	-	-	-	-	-	-
1	26	25,4	-	-	-	-	-	-
2	23	25,2	27	25,7	-	-	-	-
2	23	26,0	26	26,4	-	-	-	-
3	20	26,2	24	27,4	27	48,1	-	-
3	20	25,9	24	32	27	65,8	-	-
4	17	26,0	21	25,4	24	36,3	27	39,0
4	10	35,3	19	26,3	23	30,0	27	27,6

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

Tabla 5.8. Mejores regímenes de aclareo obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de teca con calidad de sitio II y densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹

N° de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4
Escenarios: Producción de madera/Producción de madera y secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	9	60,0	-	-	-	-	-	-
1	9	76,8	-	-	-	-	-	-
2	9	56,4	17	57,6	-	-	-	-
2	5	51,6	14	61,1	-	-	-	-
3	5	44,7	12	44,1	20	47,7	-	-
3	9	28,9	13	28,1	20	68,9	-	-
4	5	50,9	13	35,3	22	26,3	27	28,7
4	10	32,2	14	37,6	22	32,9	25	43,3
Escenario: secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	26	25,0	-	-	-	-	-	-
1	26	25,2	-	-	-	-	-	-
2	23	29,3	27	37,2	-	-	-	-
2	22	29,6	26	28,3	-	-	-	-
3	18	26,8	24	47,2	27	40,4	-	-
3	20	27,6	24	28,8	27	54,5	-	-
4	13	29,8	17	32,2	21	25,4	24	36,2
4	8	38,7	12	48,0	19	29,0	27	29,2

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

Tabla 5.9. Regímenes de aclareo alternativos obtenidos por el modelo de prescripción de aclareos para rodales de tecla con calidad de sitio II y densidad inicial de 1600 arb ha⁻¹

Nº de aclareos	E1	I1	E2	I2	E3	I3	E4	I4
Escenarios: Producción de madera/Producción de madera y secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	11	77,8	-	-	-	-	-	-
1	5	79,5	-	-	-	-	-	-
2	6	50,4	12	74,1	-	-	-	-
2	6	66,2	14	48,4	-	-	-	-
3	5	60,5	10	28,0	14	54,7	-	-
3	5	46,6	9	26,0	12	66,3	-	-
4	5	43,7	15	38,1	21	34,7	25	45,6
4	5	33,3	11	43,7	15	38,2	22	48,5
Escenario: secuestro de carbono								
0	-	-	-	-	-	-	-	-
1	26	25,4	-	-	-	-	-	-
1	26	26,1	-	-	-	-	-	-
2	22	27,0	27	25,3	-	-	-	-
2	22	26,0	27	25,8	-	-	-	-
3	20	27,7	24	27,6	27	39,1	-	-
3	18	25,2	24	38,1	27	52,0	-	-
4	8	29,6	20	29,0	23	42,3	27	26,6
4	17	34,4	21	33,2	24	48,7	27	29,0

E_i: Edad del aclareo i (años), I_i: intensidad del aclareo i (% de área basal extraída)

5.3.2 Solución óptima del modelo de aprovechamiento

Planes de corta óptimos y valor actual neto

En las Tablas 5.10 y 5.11 se resumen los resultados obtenidos por el modelo de aprovechamiento (sub-modelo 2) para los tres escenarios considerados: a) producción de madera, b) producción de madera y secuestro de carbono, y c) secuestro de carbono. Para cada año del período de planificación se especifica número de rodales aclareados, número de rodales sometidos a la corta final, volumen de madera extraído con diámetro superior a 20 cm y el volumen total aprovechado. Estos valores se presentan a partir del año 5, ya que en los años anteriores no se realizan cortas de acuerdo a los supuestos del modelo.

Tabla 5.10. Plan de cortas para los escenarios “Producción de madera” y “Producción de madera y secuestro de carbono” (resumen)

Año	No. rodales aclareados	No. rodales sometidos a corta final	Volumen extraído (dap > 20 cm) (miles de m ³)	Volumen total aprovechado (miles de m ³)
5	3	0	0,99	4,29
6	4	0	1,48	6,46
7	11	0	1,99	8,67
8	12	0	5,92	22,08
9	15	0	8,31	28,84
10	11	0	5,64	19,37
11	26	0	11,00	36,75
12	17	0	24,33	71,52
13	23	0	27,85	80,35
14	22	0	17,73	65,54
15	25	0	30,48	86,39
16	15	0	38,42	89,77
17	16	0	31,40	80,29
18	20	0	31,04	74,59
19	17	0	28,00	68,17
20	15	0	31,39	62,40
21	22	0	55,35	103,87
22	21	2	61,03	103,07
23	17	2	61,87	101,89
24	13	6	64,84	97,97
25	21	6	53,21	80,99
26	11	8	60,02	88,59
27	15	9	61,00	93,34
28	6	13	68,94	100,16
29	4	9	58,90	85,32
30	9	17	73,65	105,61
31	6	12	66,22	102,11
32	1	15	73,75	106,15
33	1	14	63,30	95,07
34	1	13	65,42	96,00
35	2	13	58,11	83,83
36	0	13	62,86	90,59
37	0	12	54,16	78,99
38	0	14	67,06	97,41
39	0	10	56,11	81,12
40	0	12	65205,2	93150,3

Tabla 5.11. Plan de cortas para el escenario “Secuestro de carbono” (resumen)

Año	No. rodales aclareados	No. rodales sometidos a corta final	Volumen extraído (dap > 20 cm) (miles de m ³)	Volumen total aprovechado (miles de m ³)
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	1	0	0,51	2,21
11	1	0	0,45	1,95
12	2	0	1,02	4,41
13	2	0	1,67	5,11
14	1	0	0,45	1,95
15	1	0	1,02	2,55
16	3	0	3,50	8,76
17	3	0	2,12	7,06
18	4	0	4,46	11,15
19	1	0	1,01	2,52
20	6	0	6,99	16,36
21	8	0	10,14	23,66
22	15	0	17,22	43,04
23	10	1	20,54	36,53
24	10	1	18,13	37,63
25	14	2	32,00	64,95
26	27	2	48,18	96,86
27	20	4	64,44	117,87
28	23	2	46,45	90,64
29	31	4	87,82	153,09
30	27	5	78,18	135,18
31	21	6	69,59	118,49
32	28	7	85,15	146,12
33	25	7	76,32	142,11
34	13	9	69,96	116,12
35	11	17	121,64	189,58
36	14	14	103,93	159,53
37	6	21	123,82	194,46
38	0	19	92,90	146,31
39	0	27	149,81	226,91
40	0	52	273,60	414,39

En la Tabla 5.12 se muestra el valor actual neto (VAN) asociado a los programas de corta encontrados por el modelo. Nótese que el VAN representa el valor objetivo que fue optimizado de acuerdo a los productos incluidos (madera, secuestro de carbono). Así por ejemplo, cuando el objetivo es el secuestro de carbono, el VAN reflejado en la Tabla 5.12 no incluye los costos e ingresos asociados al aprovechamiento y venta final de la madera.

Tabla 5.12. Valor objetivo (VAN) de los planes de corta óptimos

Escenario	VAN (millones de \$)
Producción de madera	31,03
Producción de madera y secuestro de carbono	39,50
Secuestro de carbono	11,94

En el escenario que considera la producción de madera como único objetivo del manejo y en el escenario que incluye producción de madera y secuestro de carbono, el plan de cortas óptimo generado por el modelo es el mismo (Tabla 5.10), solo hay diferencias en el valor actual neto (Tabla 5.12). Este resultado es similar al obtenido en el modelo para prescribir aclareos a nivel de rodal desarrollado en el capítulo IV, la solución óptima no cambia cuando se incluye el secuestro de carbono como un objetivo adicional del manejo (bajo las condiciones asumidas en la corrida del modelo). La madera tiene en el mercado un precio mucho más alto que el carbono, por consiguiente en la función objetivo tienen más peso los beneficios económicos de la producción de madera que los beneficios obtenidos por secuestrar carbono, por tal razón, el plan de cortas óptimo es aquel maximiza los beneficios por la producción de madera. Los beneficios del secuestro de carbono son adicionales, pero no son lo suficientemente altos como para influir en la solución óptima del modelo, si se toma como referencia un precio del carbono de 10 \$ tC⁻¹.

En la Tabla 5.12 se observa que el mayor valor actual neto se obtiene cuando se optimizan los beneficios que generan la producción de madera y el secuestro de carbono, lo cual es de esperarse ya que se consideran dos productos como objetivos del manejo. En los

escenarios que optimizan un único objetivo, se puede apreciar que cuando el objetivo es la producción de madera, el valor actual neto del programa de cortas óptimo es aproximadamente 2,6 veces mayor que cuando se optimiza solamente el secuestro de carbono, debido a la diferencia de precios entre la madera y el carbono.

Turno de los rodales

En la Tabla 5.13 se muestran algunas estadísticas relacionadas a la edad de la corta final (turno) para los rodales de la plantación, de acuerdo al plan óptimo de corta en los tres escenarios analizados.

Tabla 5.13. Estadísticas básicas para la variable “turno” de los rodales de la plantación, correspondientes a los planes óptimos de corta en distintos escenarios

Estadística	Escenarios	
	“Producción de Madera” / “Producción de madera y secuestro de carbono”	“Secuestro de carbono”
Turno promedio (años)	27,2	30,5
Turno mínimo (años)	20	20
Turno máximo (años)	38	39
Desviación estándar	4,4	4,3
No. y porcentaje de rodales con turno < 25 años	61 (30,5%)	25 (12,5%)
No. y porcentaje de rodales con turno ≥ 25 años	139 (69,5%)	175 (87,5%)

Cuando la producción de madera se incluye como uno de los objetivos del manejo, el plan de cortas óptimo indica que en el año 21 ocurre la primera corta total de un rodal (Tabla 5.10) y el turno promedio de los rodales que conforman la plantación es 27,2 años (Tabla 5.13). Si el objetivo es el secuestro de carbono, la primera corta total de un rodal se efectúa en el año 22 (Tabla 5.11) y el turno promedio es 30,5 años (Tabla 5.13). Se puede

notar en la Tabla 5.13 que en todos los escenarios el turno mínimo es 20 años, mientras que el turno máximo es un año mayor en el escenario que solo contempla el secuestro de carbono como objetivo. Igualmente se observa que cuando la madera es uno de los objetivos del manejo, en el 30,5% de los rodales la corta final se efectúa antes de los 25 años, y si se considera como único objetivo el secuestro de carbono, solamente el 12,5% de los rodales es aprovechado antes de esta edad. En cuanto a la variabilidad de la edad del turno, esta es similar en los escenarios de optimización considerados.

Los resultados anteriores indican que cuando el secuestro de carbono es el objetivo del manejo, se busca mantener la madera en pie el mayor tiempo posible, dado que esto permite mantener el carbono secuestrado por más tiempo en la biomasa de los árboles. Una vez que la madera es extraída, aunque buena parte del carbono queda almacenado en los productos forestales que se obtienen, otra parte comienza a descomponerse y en este proceso se producen emisiones de carbono al ambiente, por esta razón el modelo trata de retrasar la liberación del carbono, lo que se refleja en un turno promedio mayor. Autores como Liski *et al.* (2001), Kaipainen *et al.* (2001), Baskent *et al.* (2008) y Cao *et al.* (2010) han determinado en sus investigaciones que turnos más largos favorecen el secuestro de carbono en una plantación.

Regímenes de aclareo asignados a los rodales

Es importante señalar que en los planes de corta óptimos, a cada rodal de acuerdo a su densidad inicial y a la calidad de sitio, le es asignado uno de los regímenes de aclareo alternativos que fueron generados por el sub-modelo 1 (Tablas 5.6, 5.7, 5.8, 5.9). Debido a la gran cantidad de rodales considerados y al número de regímenes de aclareo alternativos (36 en cada escenario de optimización) no se especifica para cada rodal cuál fue el régimen asignado, sin embargo, es posible hacer algunas observaciones generales al respecto.

En los escenarios que consideran la producción de madera como uno de los objetivos del manejo, los primeros aclareos se realizan en el año 5 (Tabla 5.10), mientras que si el

objetivo es el secuestro de carbono, los aclareos comienzan en el año 10 (Tabla 5.11), cinco años más tarde, lo que indica que bajo este escenario se retrasan los raleos.

Los objetivos del manejo forestal también influyen en el número de aclareos que se aplican en los rodales de la plantación. En la tabla 5.14 se muestra el número y porcentaje de rodales a los cuales se les asigna un determinado régimen de manejo (definido según el número de aclareos), para los distintos escenarios de optimización considerados.

Tabla 5.14. Número de aclareos aplicados en los rodales de la plantación bajo diferentes escenarios de optimización

Número de aclareos	Cantidad de rodales según el régimen de aclareo asignado	
	Escenarios "Producción de Madera" y "Producción de madera y secuestro de C"	Escenario "Secuestro de carbono"
0	29 (14,5%)	62 (31,0%)
1	39 (19,5%)	39 (19,5%)
2	55 (27,5%)	38 (19,0%)
3	55 (27,5%)	31 (15,5%)
4	22 (11,0%)	30 (15,0%)
Total rodales	200	200

Se observa en la Tabla 5.14 que cuando la madera se incluye como objetivo, a la mayoría de los rodales (55%) se le aplican 2 o 3 aclareos, ya que estos son los regímenes que generan mayores beneficios, tal como se mostró en los resultados del modelo de prescripción de aclareos del capítulo IV. Si el manejo se orienta al secuestro de carbono, en gran parte de los rodales (31%) no se efectúan aclareos, los demás regímenes (1-4 aclareos) se aplican en menores proporciones; así, el modelo busca efectuar pocos aclareos, debido a las emisiones que se producen inmediatamente después de realizar las cortas. Este resultado sugiere que las emisiones de carbono ocasionadas por los aclareos tienen mayor peso en la función objetivo que el incremento en el secuestro de carbono

que ocurre al obtener madera de mayor diámetro como respuesta a los raleos, la cual puede destinarse a productos forestales de larga duración. Un resultado similar fue encontrado por Raymer *et al.* (2009) quienes al analizar diferentes estrategias de manejo para incrementar los beneficios obtenidos del secuestro de carbono en un área forestal de Noruega, determinaron que para optimizar dichos beneficios deben realizarse menos aclareos; también Bateman y Lovett (2000) señalan que si se desea incrementar el secuestro de carbono deben evitarse los aclareos.

Cumplimiento de las cuotas de producción (volúmenes aprovechados)

En los programas de corta óptimos es importante analizar el cumplimiento de las cuotas anuales de producción que fueron fijadas, y que se refieren a los volúmenes de madera con diámetro superior a 20 cm que deben cosecharse en cada año del período de planificación. En los escenarios que consideran la producción de madera como uno de los objetivos del manejo es posible cumplir con la cuota establecida, no ocurre lo mismo cuando el manejo está orientado únicamente al secuestro de carbono.

Como una medida del cumplimiento de las cuotas de producción, el modelo calcula para el plan de cortas óptimo la desviación de las cuotas anuales (en m³), sumando año a año la diferencia entre el volumen de madera producido (dap > 20 cm) y la cuota establecida (ecuación [5.10]). En el programa de corta óptimo obtenido para los escenarios que consideran la producción de madera la desviación es igual a cero, porque se cumple con las cuotas de producción, mientras que en el escenario que considera solamente el secuestro de carbono la desviación fue 579,23 miles de m³, ya que en algunos años no se aprovecha la madera suficiente para cumplir con las cuotas fijadas. Esto significa que cuando el objetivo es maximizar el VAN asociado al secuestro de carbono, se deja de producir el 40,6% de la madera necesaria para cumplir con la cuota de producción establecida para el período de planificación (1425000 m³), a favor de obtener el mayor secuestro de carbono posible. Al analizar el volumen cosechado cada año, se puede notar que en el escenario que considera el secuestro de carbono como único objetivo (Tabla 5.11), las cuotas de producción no se alcanzan durante los primeros 26 años, dejándose

una cantidad de madera considerable para ser aprovechada al final del período de planificación. Así por ejemplo, en el año 40 se extrae un volumen de madera rolliza (dap > 20 cm) igual a 273,6 miles de m³, cantidad mucho mayor que la cuota fijada para ese año (60 mil m³). Es importante recordar que uno de los supuestos del modelo es hacer la corta total de todos los rodales al final del año 40, en trabajos futuros sería interesante asumir que la plantación puede mantenerse en el tiempo y determinar bajo ese escenario, los mejores regímenes de manejo a aplicar.

El comportamiento del volumen cosechado (dap > 20 cm) puede apreciarse en las Figuras 5.4 y 5.5. Se observa que bajo los escenarios “Producción de madera” y “Producción de madera y secuestro de carbono” los volúmenes aprovechados son más estables, de acuerdo a las cuotas de producción fijadas, y en el escenario “Secuestro de carbono” los mayores volúmenes de cosecha se obtienen en los últimos años del período de planificación. Un patrón de cosecha similar se observa en el volumen total aprovechado (Tablas 5.10 y 5.11).

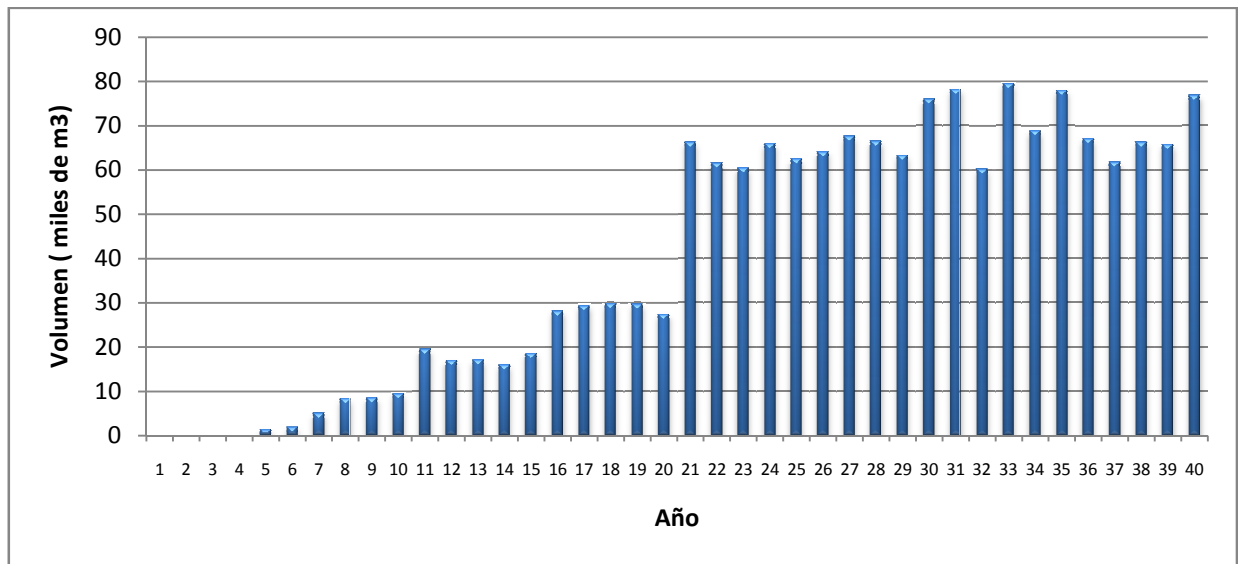


Figura 5.4. Volumen extraído (dap > 20 cm) bajo los escenarios “Producción de madera” y “Producción de madera y secuestro de carbono”

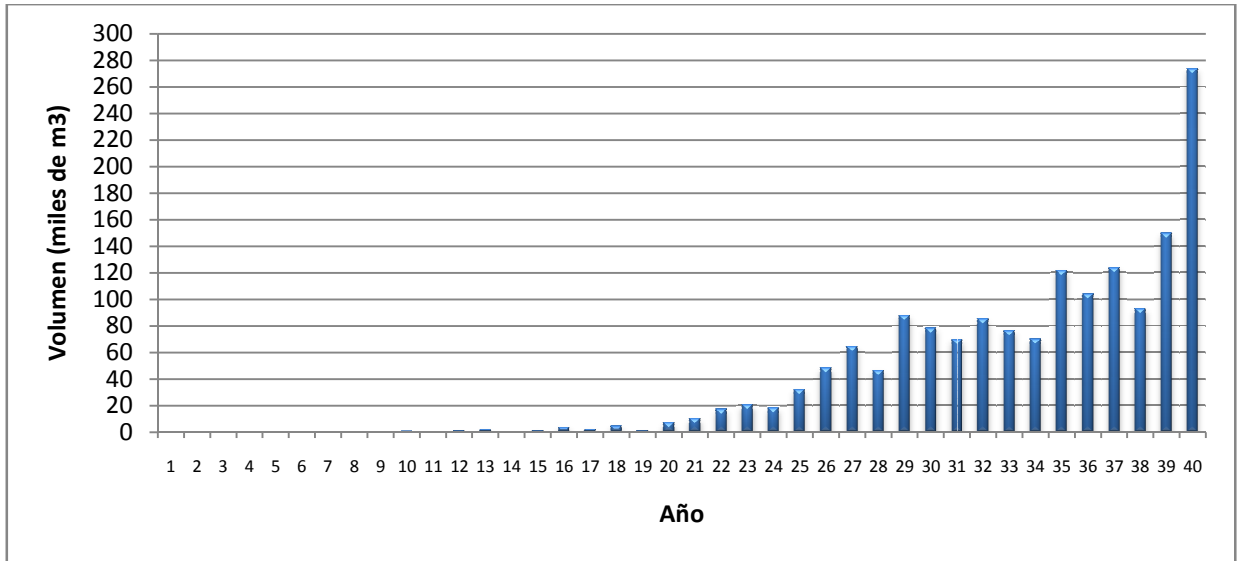


Figura 5.5. Volumen extraído (dap > 20 cm) bajo el escenario "Secuestro de carbono"

Diámetro promedio de la madera aprovechada

El modelo calcula el diámetro promedio del vuelo extraído en cada año del período de planificación. En la Figura 5.6 se puede apreciar el comportamiento de esta variable en el tiempo bajo los escenarios considerados. Los gráficos muestran una tendencia creciente en el diámetro de la madera extraída. También se puede notar que bajo los escenarios que incluyen la producción de madera es posible obtener diámetros superiores a los obtenidos cuando se optimiza únicamente el secuestro de carbono, ya que los regímenes de aclareo aplicados son aquellos que maximizan los beneficios de la producción de madera, lo cual se logra al obtener madera de mayor diámetro por ser la de más valor.

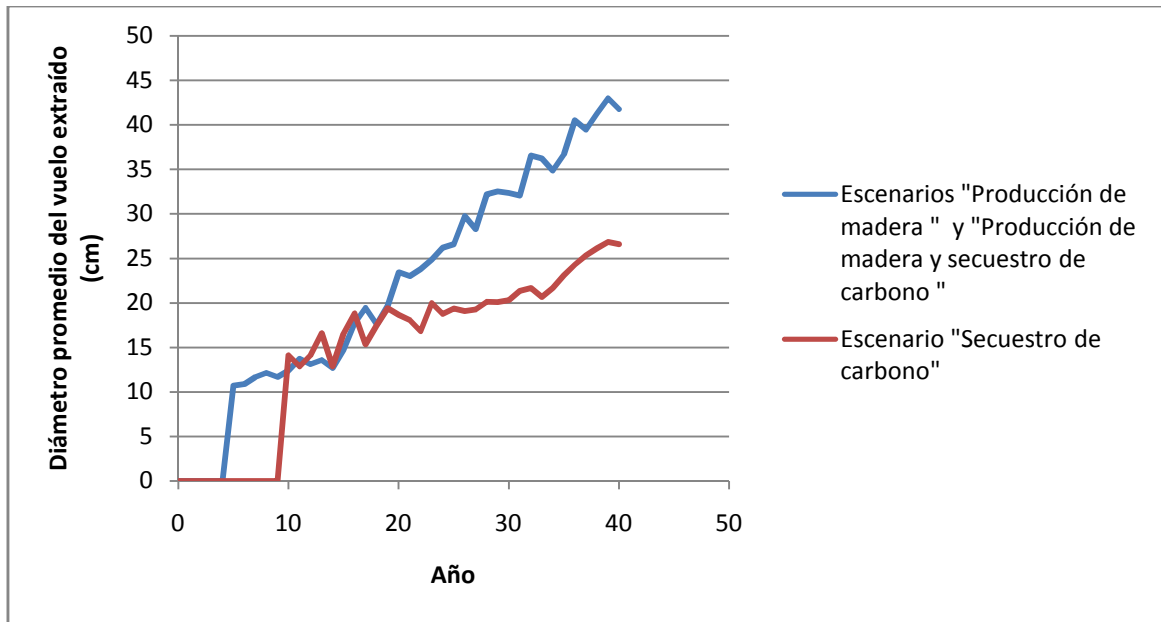


Figura 5.6. Diámetro promedio del vuelo extraído en distintos escenarios de optimización

Visualización de los programas de corta óptimos

El caso de estudio incluye 200 rodales y un período de planificación de 40 años, por lo tanto se hace difícil mostrar en este trabajo los planes de corta que el modelo genera, los cuales indican para cada año los rodales que deben ser intervenidos y las intensidades de las cortas. Sin embargo, haciendo uso de un Sistema de Información Geográfica es posible visualizar la distribución espacial de los rodales a cortar para cualquier año del período de planificación, así como también las intensidades de corta. A manera de ejemplo, en las Figuras 5.7, 5.8, y 5.9 se presentan los planes de corta correspondientes los años 10, 25 y 40, para los escenarios de optimización considerados; el color de los rodales indica la intensidad de la corta (aclareo o corta final), los rodales en blanco no están incluidos en la programación de cortas de ese año.

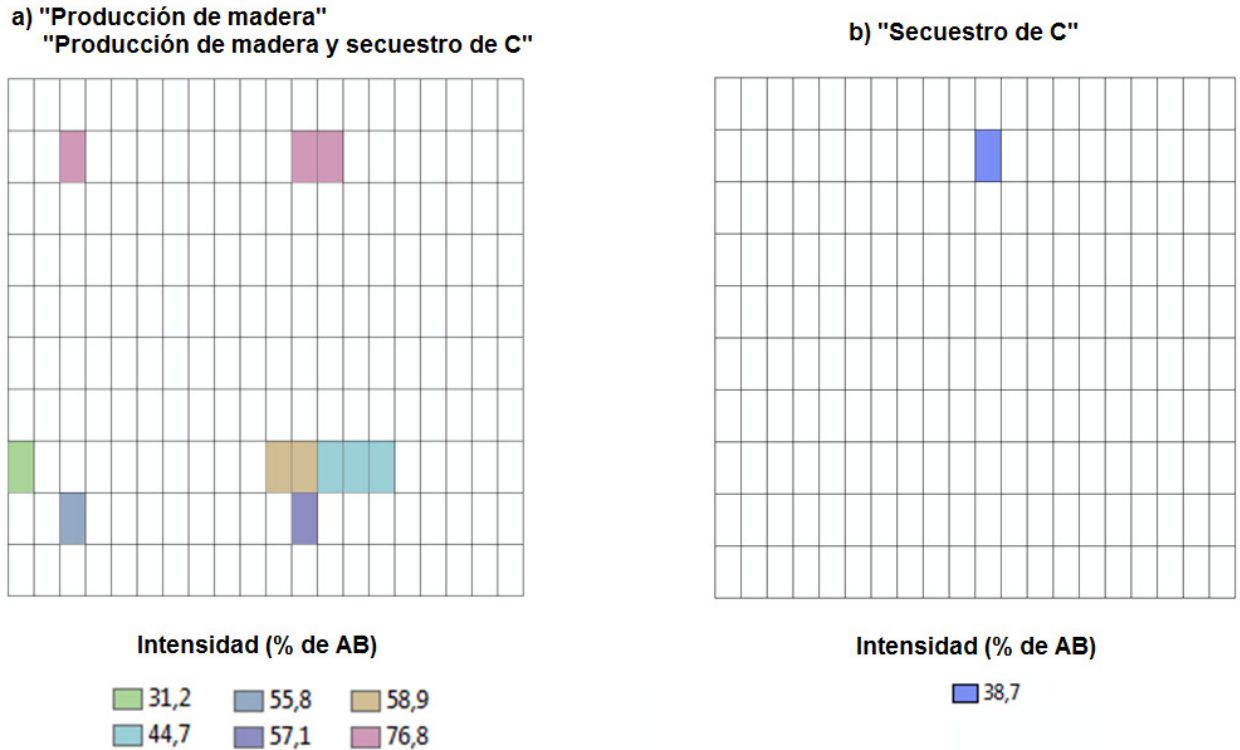


Figura 5.7. Rodales que deben ser cortados en el año 10 según el plan de cortas óptimo, bajo diferentes escenarios de optimización

En la Figura 5.7 se puede observar que en el año 10 se aclarean más rodales si se optimizan los beneficios de la producción de madera, que cuando el manejo se orienta únicamente al secuestro de carbono, en cuyo caso solo se prescriben cortas en un rodal; tal como se mencionó anteriormente, en este escenario las cortas se retrasan para evitar las emisiones de carbono que ocurren después de una intervención. Lo contrario ocurre en el año 25, en la Figura 5.8 es posible apreciar que ese año se aclarean más rodales cuando el objetivo es secuestrar carbono, además las intensidades de los raleos son menores en comparación con los escenarios que incluyen la producción de madera.

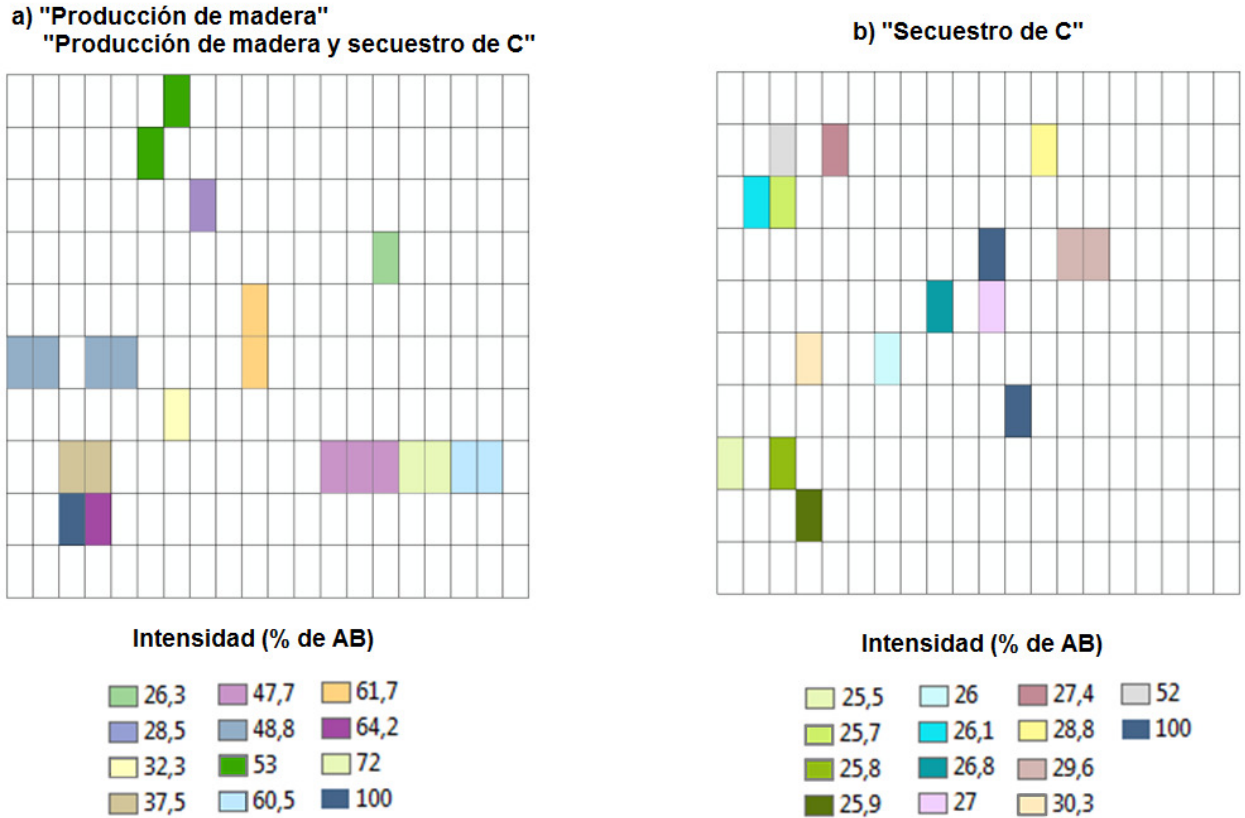


Figura 5.8. Rodales que deben ser cortados en el año 25 según el plan de cortas óptimo, bajo diferentes escenarios de optimización

En la Figura 5.9 se aprecia que en el último año del período de planificación (año 40) se realiza la corta total de todos los rodales que aún mantienen árboles en pie. Cuando se considera la producción de madera, la mayoría de los rodales (94%) ya se han sometido a la corta final previamente (rodales de color blanco) y quedan solamente 12 rodales (6%) para ser aprovechados en el año 40. En el escenario "Secuestro de carbono" en el año 40 se cortan 52 rodales (26% del total), un 20% más que en los escenarios que incluyen la producción de madera. Una vez más, se observa que cuando el objetivo es únicamente secuestrar carbono, se trata de conservar el carbono almacenado en los árboles en pie el mayor tiempo posible, tomando en cuenta las restricciones y supuestos del modelo.

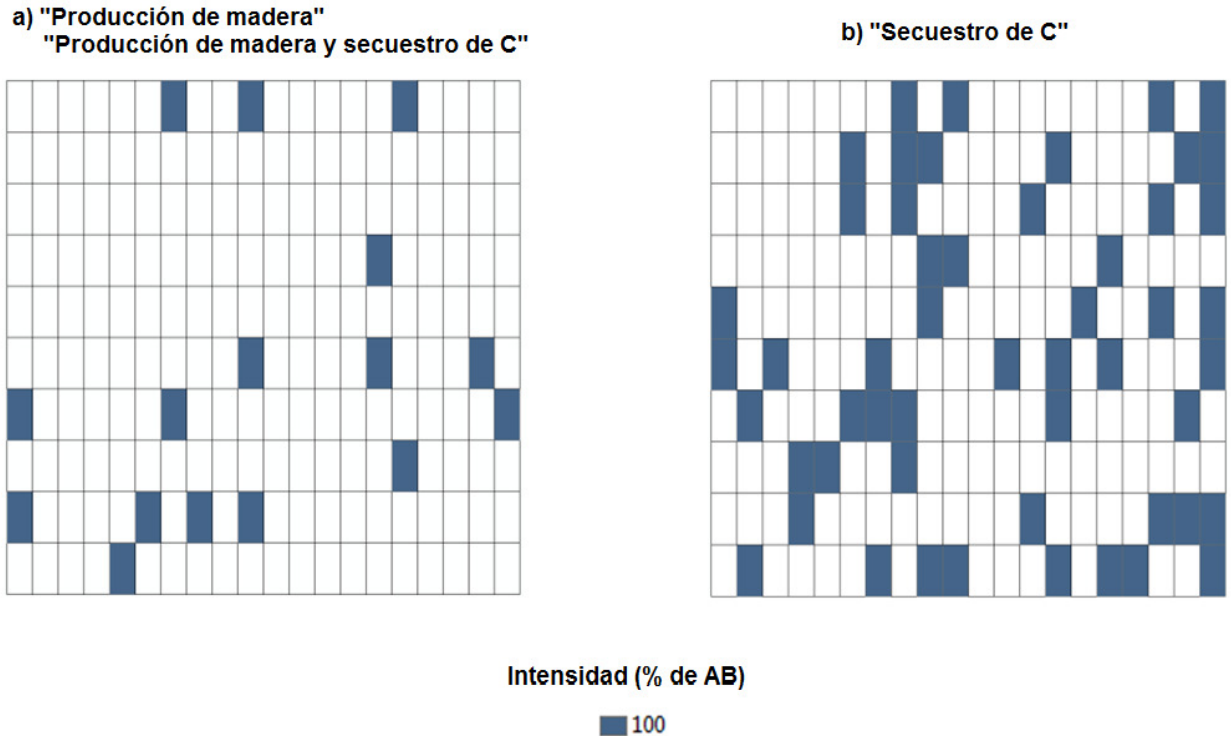


Figura 5.9. Rodales que deben ser cortados en el año 40 (corta final) según el plan de cortas óptimo bajo diferentes escenarios de optimización

También en las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 es posible ver la distribución de los rodales que deben ser cortados en un año, lo cual resulta útil al momento de considerar la implementación del plan de cortas. El índice espacial utilizado en el modelo trata de agrupar en la medida de lo posible los rodales que deben ser aprovechados en un año, no obstante, el distanciamiento que se observa en algunos casos se debe a que los rodales tienen diferentes características (edad, densidad inicial y calidad de sitio) que influyen en los volúmenes de madera disponibles en cada año, lo que hace que en ocasiones sea necesario cortar rodales un poco alejados con el fin de satisfacer las cuotas de producción.

5.3.3 Relación entre los beneficios de la producción de madera y el secuestro de carbono

A partir de los planes de corta óptimos generados por el modelo, se analizó la interacción entre los beneficios obtenidos de la producción de madera y los obtenidos del secuestro de carbono, en los escenarios que solo consideran un producto en la optimización (“Producción de madera” o “Secuestro de carbono”), siguiendo el enfoque utilizado por Raymer *et al.* (2009). Para ello, se calculó el VAN de los beneficios que se podrían conseguir por secuestro de carbono ($VAN_{carbono}$), si se aplica el plan de cortas que optimiza los beneficios de la producción de madera, e igualmente, se calculó el VAN de los beneficios que se recibirían por la producción de madera (VAN_{madera}), si se implementara el plan de cortas que maximiza el secuestro de carbono. Estos valores se compararon con los óptimos generados por el modelo, es decir, el VAN_{madera} cuando se optimiza la producción de madera, y el $VAN_{carbono}$ cuando se optimiza el secuestro de carbono (Tabla 5.15).

Tabla 5.15. Valor actual neto de los beneficios de la producción de madera (VAN_{madera}) y el secuestro de carbono ($VAN_{carbono}$) en distintos escenarios de optimización, para una plantación de teca de 10000 ha

	Escenario de optimización		Diferencia (millones de \$)
	“Producción de Madera”	“Secuestro de carbono”	
VAN_{madera} (millones de \$)	31,03	8,08	22,95
$VAN_{carbono}$ (millones de \$)	8,47	11,94	3,47

Se observa en la Tabla 5.15 que la diferencia entre el $VAN_{carbono}$ obtenido en los dos escenarios de optimización es 3,47 millones de \$, este valor refleja el mayor incremento posible en los beneficios de carbono que puede lograrse mediante cambios en los planes de manejo, específicamente modificando las edades e intensidades de los aclareos y la

edad del turno en los rodales. El costo de lograr dicho incremento en los beneficios del secuestro de carbono es la diferencia entre el VAN_{madera} obtenido en los dos escenarios de optimización, la cual es 22,95 millones de \$. Desde el punto de vista financiero y bajo las condiciones asumidas en este trabajo, no es rentable orientar el manejo de teca únicamente al secuestro de carbono, ya que el costo es mayor que el beneficio. En plantaciones de otras especies, como por ejemplo Pino caribe o Eucalipto, cuya madera es de menor valor comercial que la madera de teca, los proyectos de secuestro de carbono pudieran ser más atractivos.

Los cálculos anteriores indican que al maximizar los beneficios del secuestro de carbono, disminuyen en 73,9% los beneficios de la producción de madera; y si se optimizan los beneficios de la producción de madera, los beneficios por secuestro de carbono son 29% más bajos que los reportados en el escenario que optimiza el secuestro de carbono. Se observa que el logro de un objetivo afecta la consecución del otro objetivo. Estos resultados son consistentes con estudios previos que señalan que si se maximiza el secuestro de carbono, disminuyen los niveles de cosecha y los beneficios que se obtienen del aprovechamiento de la madera, en comparación a los valores obtenidos con el enfoque clásico que considera la producción de madera como único objetivo del manejo (Díaz-Balteiro *et al.*, 2003; Báckeus *et al.*, 2005; Raymer *et al.* 2009; Nepal *et al.*, 2012).

5.3.4 Análisis del secuestro de carbono

En la Figura 5.10 se presenta un gráfico del carbono almacenado en la plantación, incluye el carbono en árboles en pie, productos forestales y desechos de las cosechas (madera muerta y desperdicios). Como es de esperarse, en el escenario que optimiza los beneficios del secuestro de carbono, se logra almacenar mayores cantidades durante los 40 años del período de planificación, alcanzando su valor máximo en el año 24. En los escenarios que incluyen la producción de madera como objetivo del manejo las cantidades de carbono almacenado son menores, debido a que se realizan los aclareos a edades más tempranas y

a mayor intensidad, y en promedio el turno de los rodales se hace más corto, lo que hace que se produzcan mayores emisiones que disminuyen el flujo neto de carbono; en estos escenarios el valor máximo para el carbono almacenado se obtiene en el año 23.

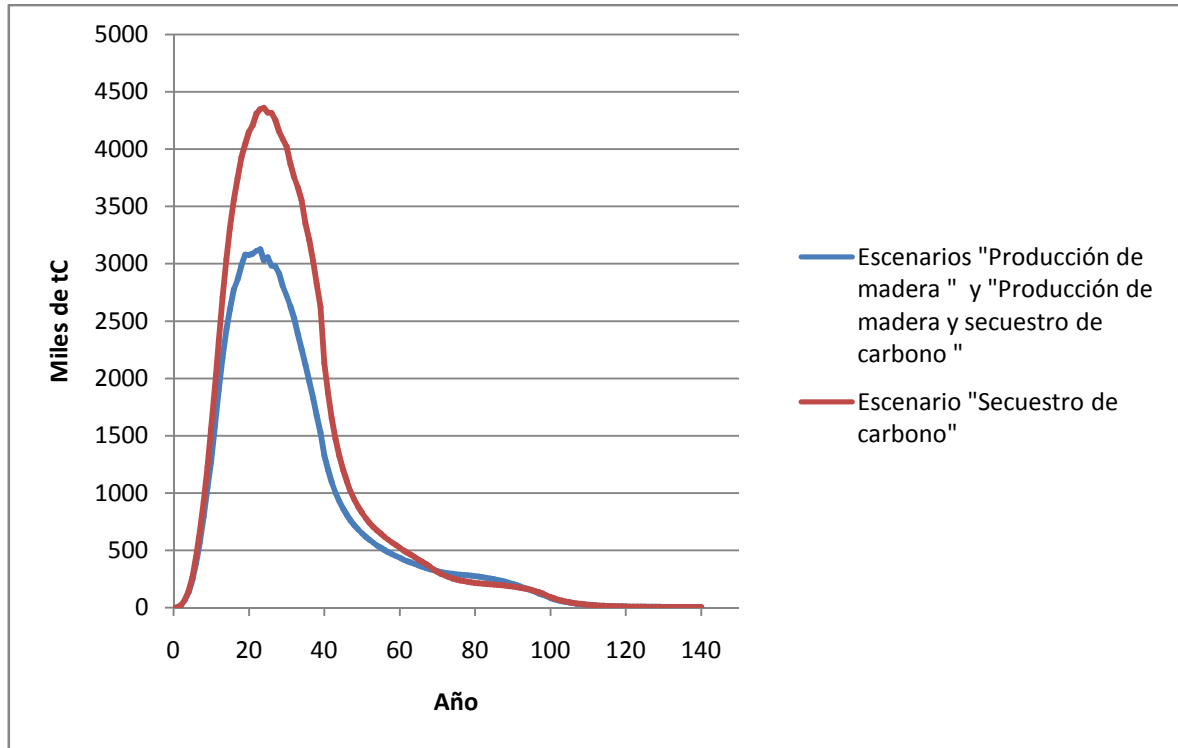


Figura 5.10. Carbono almacenado en árboles en pie, productos forestales y desechos de las cortas, correspondiente a una plantación de teca de 10000 ha bajo distintos escenarios de optimización

A partir del año 40, momento en que se realiza la corta final de todos los rodales que aún no habían sido aprovechados, parte del carbono que previamente fue secuestrado por la plantación se mantiene almacenado en los productos forestales obtenidos, en los desechos que se originan de las cosechas tales como raíces, tocones, ramas y corteza, y en los desperdicios obtenidos en el procesamiento de la madera. La otra parte del carbono secuestrado comienza a liberarse a la atmósfera según las tasas de descomposición y el tiempo antrópico de los productos y desechos, por tal razón, la curva de carbono almacenado va disminuyendo gradualmente, como puede notarse en la Figura 5.10,

aproximadamente a los 110 años se ha emitido nuevamente a la atmósfera todo el carbono almacenado.

En las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se presentan gráficos para el carbono almacenado en las distintas categorías de productos forestales (corta, media y larga duración), bajo los escenarios de optimización considerados. En la Figura 5.11 se puede apreciar que en los escenarios que consideran la producción de madera, se almacena carbono en productos de corta duración (estantillos, parales) a partir del año 5, ya que en ese momento se realiza el primer aclareo en algunos rodales de la plantación. En el escenario “secuestro de carbono” después del año 28 se almacena más carbono en productos de corta duración que en los demás escenarios, debido a que el diámetro medio de la madera extraída en las cortas es menor y en consecuencia mayor proporción del volumen cosechado se dedica a productos de corta duración.

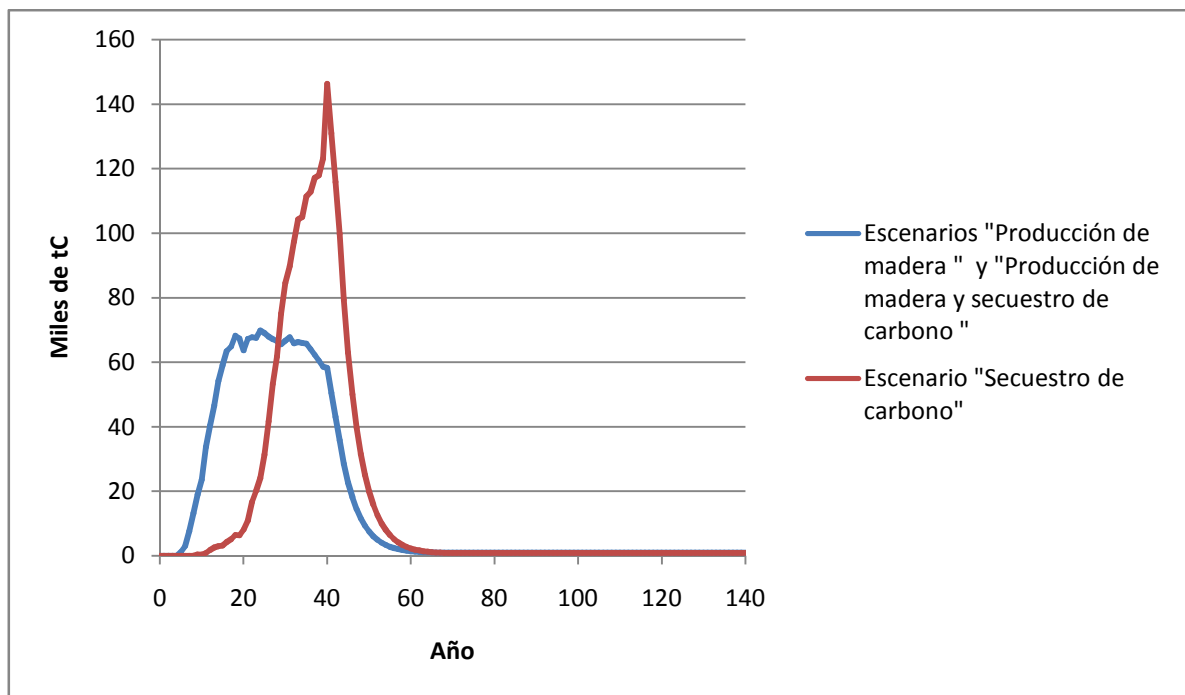


Figura 5.11. Carbono almacenado en productos forestales de corta duración obtenidos en una plantación de teca de 10000 ha

En la Figura 5.12 se muestra el carbono almacenado en los productos de duración media (puntales, varetas), la curva es creciente hasta el año 40 cuando culmina el período de planificación, alcanzando su valor máximo ese mismo año. Después de realizar la corta total de todos los rodales, el carbono almacenado comienza a disminuir, ya en el año 90 las cantidades de carbono en productos de duración media son prácticamente nulas. Antes del año 37, los escenarios que incluyen la producción de madera como objetivo, presentan mayores cantidades de carbono en productos de esta categoría, ya que bajo este escenario se aprovecha mayor volumen de madera durante los primeros años, por ende se obtienen más productos de este tipo. Luego, en los últimos tres años del período de planificación esta situación se revierte, bajo el escenario que solo incluye secuestro de carbono hay más cortas y el diámetro de los árboles aprovechados es menor, lo que hace que mayor proporción de la madera extraída se destine a productos de duración media.

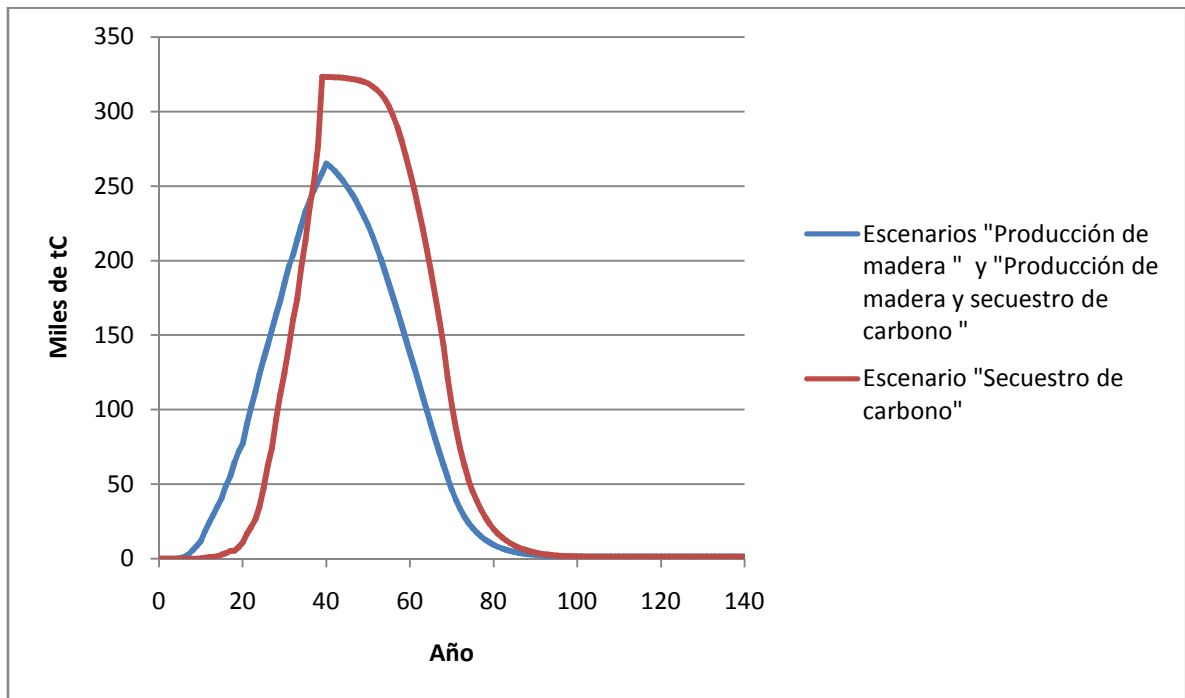


Figura 5.12. Carbono almacenado en productos forestales de duración media obtenidos en una plantación de teca de 10000 ha

La Figura 5.13 muestra los gráficos de carbono almacenado en productos forestales de larga duración (vigas, machihembrado), es posible ver que en los escenarios que optimizan la producción de madera, hay más cantidad de carbono en esta categoría de productos que el escenario que optimiza solamente el secuestro de carbono. Este resultado es lógico, ya que los regímenes de aclareo utilizados para maximizar los beneficios de la producción de madera permiten obtener árboles de mayor diámetro por ser los que tienen más valor comercial, y en consecuencia mayor proporción de los volúmenes extraídos se dedica a la fabricación de productos de larga duración. El carbono se mantiene almacenado en este tipo de productos por 60 años, por ello la curva es constante después que se efectúa la corta final, luego, al culminar la vida útil de estos productos se comienza a liberar carbono al ambiente y las cantidades de carbono almacenado disminuyen. Se observa también en la Figura 5.13 que las emisiones de carbono originadas por la descomposición de estos productos culminan aproximadamente a los 130 años.

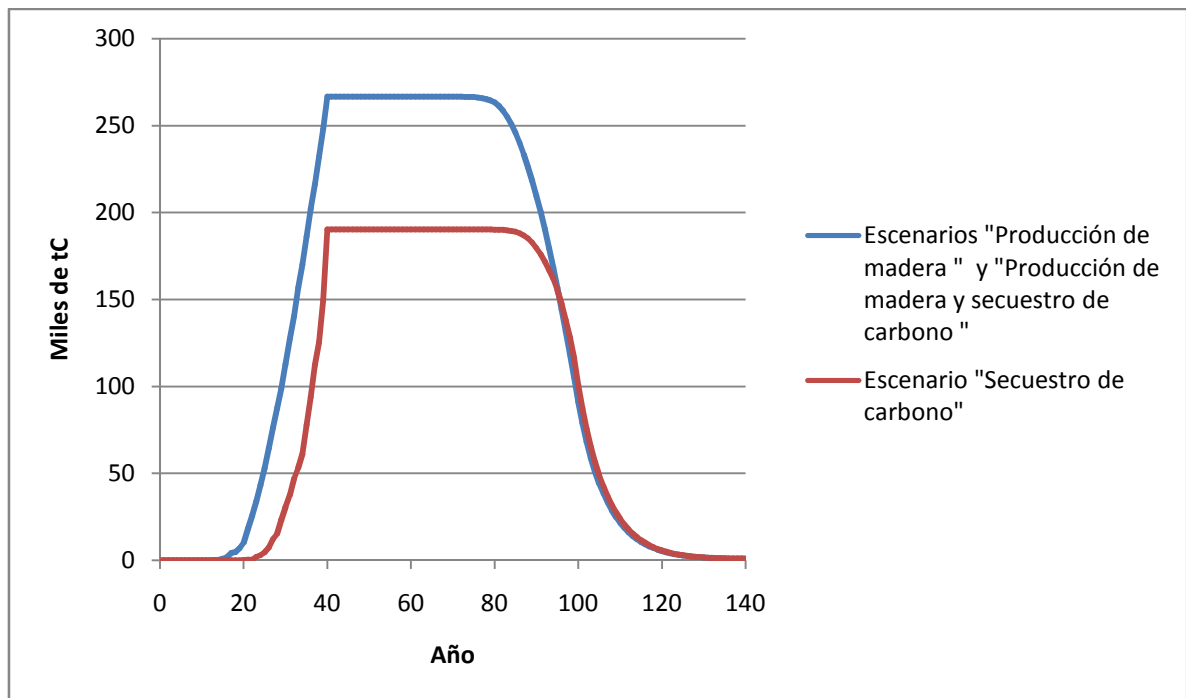


Figura 5.13. Carbono almacenado en productos forestales de larga duración obtenidos en una plantación de teca de 10000 ha

5.3.5 Tiempo de ejecución de los algoritmos de optimización

Los algoritmos heurísticos diseñados encontraron la solución óptima del problema en poco tiempo. En el caso del modelo que prescribe regímenes de aclareo (sub-modelo 1), cuando el único objetivo del manejo es la producción de madera, el Algoritmo Genético tarda 9,2 segundos en generar un listado con 9 regímenes de aclareo alternativos para un rodal; si se incluye el secuestro de carbono, el tiempo de ejecución del algoritmo es 23,9 segundos, es mayor debido a las operaciones que deben ejecutarse para calcular el flujo de carbono en cada iteración del algoritmo. En ambos escenarios se ejecutaron 100 iteraciones para hallar un régimen de aclareo.

En cuanto al modelo de aprovechamiento para la plantación (sub-modelo 2), si solo se considera la producción de madera, el algoritmo de Recocido Simulado genera el programa de cortas óptimo para los 200 rodales en 45,3 segundos, y en 65 segundos cuando el secuestro de carbono se incluye en los objetivos del modelo. En los dos escenarios se realizaron 500 iteraciones del algoritmo y 50 iteraciones en cada nivel de temperatura del recocido simulado.

Los tiempos de ejecución necesarios para ejecutar los algoritmos heurísticos son aceptables. Los resultados sugieren que este tipo de técnicas pueden ser bastante rápidas para resolver problemas complejos de planificación forestal.

5.3.6 Análisis de sensibilidad

Etapa 1: en el capítulo IV se determinó que el modelo de prescripción de aclareos que considera como objetivos la producción de madera y el secuestro de carbono (sub-modelo 1) es muy sensible a las variaciones en la tasa de crecimiento y en los precios de la madera rolliza, y moderadamente sensible a los cambios en la tasa de interés. Igualmente, los regímenes óptimos de aclareo se ven afectados cuando el precio del carbono alcanza los 40\$ tC⁻¹ o un precio superior a este. Partiendo de estos resultados, se puede afirmar que el modelo de planificación del aprovechamiento para múltiples rodales también es

sensible a los cambios en estas variables; al modificarse los regímenes de aclareo, el plan de cortas óptimo para la plantación también cambia pues este se construye a partir de los regímenes de aclareo alternativos que el sub-modelo 1 genera.

Etapa 2: de acuerdo al análisis de sensibilidad efectuado en el capítulo IV, el modelo de aclareos o sub-modelo 1 no es sensible a cambios en el costo de corta, tampoco cuando el precio del carbono aumenta entre 10 y 20 \$ tC⁻¹. Por tal razón, fue necesario determinar si el modelo de aprovechamiento (sub-modelo 2) es sensible a estos cambios o por el contrario, tiene el mismo comportamiento del sub-modelo 1.

Variable “Costo de corta”

Se realizaron variaciones entre ± 10 y $\pm 50\%$, a intervalos de 10%, en el valor original utilizado (14,24 \$ m⁻³) y en todos los casos el plan de cortas óptimo se mantuvo igual, lo que indica que el modelo de planificación del manejo no es sensible los cambios en el costo de corta, al menos en el rango de variación analizado.

Variable “Precio del carbono”

La sensibilidad del modelo a los cambios en el precio del carbono se investigó para incrementos de 10 \$tC⁻¹ sobre el valor fijado en este trabajo (10 \$tC⁻¹). Se hicieron corridas del modelo de aprovechamiento utilizando un precio del carbono igual a 20 \$tC⁻¹ y 30 \$tC⁻¹. Los resultados obtenidos indican que el modelo de planificación del manejo no es sensible a estos cambios en el precio del carbono, pues la solución óptima se mantiene. Sin embargo, es importante recalcar que previamente en la etapa 1 del análisis de sensibilidad se determinó que la solución óptima se modifica cuando el precio del carbono es 40 \$ tC⁻¹ o más, ya que las edades para efectuar los aclareos se prolongan y en la mayoría de los casos las intensidades son menores.

Etapa 3: el análisis de sensibilidad del modelo ante variaciones en los costos de transporte y en las cuotas anuales de producción son los siguientes.

Variable “Costo transporte”

Las variaciones realizadas en esta variable no afectan la solución del modelo, el plan de cortas óptimo para la plantación sigue siendo el mismo. Por lo tanto, el modelo no es sensible a los costos de transporte en el rango de variación utilizado.

Variable “Cuotas de producción”

Cuando la cuota de producción entre los años 7 y 20 aumenta 5000 o 10000 m³ en cada año (escenarios 1, 2, 3, Tabla 5.5), el plan de cortas óptimo cambia, ya que el régimen de aclareo que se asigna a cada rodal y la edad de la corta final se modifican para cumplir con las nuevas cuotas. Si la cuota fijada para los años 21-40 aumenta de 60000 a 65000 m³, no es posible encontrar una solución que satisfaga esa demanda de madera. Este último resultado indica que el modelo también puede ser útil para determinar la capacidad de producción de madera de una plantación.

En los escenarios que contemplan una disminución en las cuotas de producción (escenarios 5, 6, 7, 8, Tabla 5.5), la solución óptima sigue siendo la misma, sin embargo, el volumen producido sobrepasa por mucho la cuota anual de producción.

5.4 Conclusiones

Los modelos de optimización matemática pueden ser empleados para abordar problemas de planificación del manejo forestal que consideran distintos aspectos, tales como determinación de regímenes de aclareo, definición de la edad del turno, cumplimiento de cuotas de producción, inclusión de diferentes objetivos en el manejo (ej. producción de madera y el secuestro de carbono), agregación espacial de las operaciones de cosecha, variables financieras, entre otros.

El enfoque de modelado utilizado en este capítulo permitió abarcar varios de estos aspectos e integrar dos niveles de resolución en la planificación: nivel rodal y nivel bosque. A nivel de rodal se manejó el problema de prescripción de aclareos, usando una

heurística basada en Algoritmos Genéticos fue posible encontrar los “mejores regímenes de aclareo” para un rodal, es decir, aquellos que generan los mayores beneficios económicos. A nivel de bosque, el modelo se diseñó con el fin de determinar un plan de cortas para una plantación conformada por múltiples rodales; para ello, el modelo asigna a cada rodal un régimen de aclareo, seleccionado entre los que producen mayores beneficios, y determina la edad de la corta final, tomando en consideración que en cada año existe una cuota de producción que debe ser satisfecha. El Recocido Simulado como técnica heurística fue eficiente para implementar dicho modelo.

De esta manera, las soluciones obtenidas con un modelo de rodal fueron utilizadas para alimentar un modelo de planificación del aprovechamiento a nivel de plantación. Esta forma de enlazar los dos niveles de resolución dio buenos resultados, ya que permitió obtener un plan de cortas óptimo para una plantación, el cual identifica los rodales que deben ser aclareados o aprovechados en cada año de un horizonte de planificación, considerando las restricciones operativas del problema.

El caso de estudio analizado en este trabajo, aunque hipotético, permitió apreciar la utilidad del modelo y su capacidad para manejar un número grande de rodales. Ya que los datos en los que se fundamenta el caso de estudio están basados en plantaciones reales de *Tectona grandis* L.f., fue posible estudiar la interacción entre la producción de madera y el secuestro de carbono. En este particular, se observó que el plan de cortas óptimo es el mismo en el escenario que solo considera la producción de madera y en el escenario que incluye madera y secuestro de carbono como objetivos del manejo; esto se debe a que la teca tiene un alto valor comercial y el precio asignado al carbono es bajo, lo que hace que los beneficios obtenidos por la venta de madera tengan más peso sobre la función objetivo y en consecuencia, son los que determinan la solución óptima del modelo en ambos escenarios. Un análisis del precio de carbono arrojó que este comportamiento se mantiene para precios del carbono por debajo de los 40 \$tC⁻¹, pero si el precio es al menos 40 \$tC⁻¹, los regímenes de manejo cambian para favorecer el secuestro de carbono. Cuando el secuestro de carbono tiene prioridad como objetivo del manejo, los planes de

corta incluyen menos aclareos, aclareos más tardíos y a intensidades menores, y turnos más largos.

Asimismo, en el análisis de los resultados se determinó que al implementar planes de manejo que incrementan los beneficios del secuestro de carbono, los beneficios por la producción de madera disminuyen, y viceversa; ambos objetivos están en conflicto. A pesar de esto, los resultados sugieren que las plantaciones de teca tienen potencial para el secuestro de carbono, independientemente de que los planes de manejo estén orientados principalmente a la producción de madera con fines industriales. El carbono secuestrado por los rodales en crecimiento se puede mantener almacenado en los árboles en pie hasta la edad de las cortas, y más allá de estas una porción considerable del carbono se sigue almacenando en forma de productos forestales por un período de tiempo, el cual está relacionado a la vida útil y a la tasa de descomposición de los productos.

La solución óptima del modelo puede alterarse si se modifican algunas variables de entrada o parámetros. El análisis de sensibilidad mostró que el modelo es sensible a los cambios en la tasa de crecimiento, tasa de interés, precios de la madera y al aumento en las cuotas anuales de producción, por tal motivo, es importante prestar especial atención a los valores de estas variables que se utilizan en una corrida del modelo. Otros datos de entrada como los costos de transporte y el costo de corta no son determinantes al momento de obtener la solución óptima.

El modelo para la planificación del manejo en plantaciones forestales presentado en este capítulo constituye una herramienta que puede facilitar la gestión forestal, ya que brinda información basada en el crecimiento de la masa forestal, considera el impacto de los regímenes de corta utilizados y toma en cuenta variables financieras para cuantificar el éxito económico de la plantación. El plan óptimo de cortas que el modelo genera permite determinar patrones de cosecha futuros para la plantación, además puede ser el punto de partida para diseñar planes operacionales, relacionados con la programación de las cortas, asignación de tareas en campo, construcción de caminos forestales, movimiento de maquinarias, entre otros aspectos de la planificación. A pesar de que el modelo fue

desarrollado bajo supuestos y condiciones operativas muy concretas, es posible adaptarlo a otros problemas y escenarios de la industria forestal venezolana.

5.5 Referencias

- Álvarez S (2009) *Optimización de la plantación forestal considerando la captura de carbono en bosque de pino-encino en la sierra Suárez, Oaxaca, México*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Montes. Manuscrito. Madrid, España. 174 pp.
- Backéus S, Wikström P, Lämås T (2005) A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production. *Forest Ecology and Management* 216: 28-40
- Baskent EK, Keles S, Yolasigmaz HA (2008) Comparing multipurpose forest management with timber management, incorporating timber, carbon and oxygen values: A case study. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 105-120.
- Bateman IJ, Lovett AA (2000). Estimating and valuing the carbon sequestered in softwood and hardwood trees, timber products and forest soils in Wales. *Journal of Environmental Management* 60: 301-323..
- Bettinger P, Boston K, Siry JP, Grebner DL (2009 a) *Forest Management and Planning*. Academic Press, Elsevier. San Diego, EEUU. 331 pp.
- Bettinger P, Chung W (2004) The key literature of, and trends in, forest-level management planning in North America, 1950-2001. *International Forest Review* 6: 40-50.
- Bettinger P, Sessions J, Boston K (2009 b) A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning. *International Journal of Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences* 1: 26-37.
- Cao T, Valsta L, Mäkelä A (2010) A comparison of carbon assessment methods for optimizing timber production and carbon sequestration in Scots pine stands. *Fuel and Energy Abstracts* 260(10): 1726-1734.
- Clutter JL, Forson JC, Pienaar LV, Brister GH y Bailey RL (1983) *Timber Management: A Quantitative Approach*. John Wiley & Sons. Nueva York, EEUU. 333 pp.

- Cubero J, Rojas S (1999) *Fijación de carbono en plantaciones de melina (Gmelina arborea Roxb.), teca (Tectona grandis L.f.) y pochote (Bombacopsis quinata Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. Tesis Licenciatura en Ciencias Forestales. Escuela de Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 95 pp.
- Díaz-Balteiro L, Rodríguez L (2006) optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration – A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecology and Management* 229: 247 – 258.
- Díaz-Balteiro L, Romero C (2003) Carbon captured as a new instrument in forest management: some implications. *Scientia Forestalis* 63: 103-114.
- Dréo J, Pétrowski A, Siarry P, Taillard E (2006) *Metaheuristics for hard Optimization*. Springer - Verlag. Berlín, Alemania. 369 pp.
- EcoBosques (s/f). *La teca como sumidero de CO₂*. [documento en línea]. Disponible desde Internet en: www.ecobosques.com/Pdfs/Estudiocaptacion.pdf . [con acceso el 20-04-12].
- Gera N, Gera H, Bisht NS (2011) Carbon sequestration potential of selected plantation interventions in Terai region of Uttarakhand. *Indian Forester* 137: 273-289.
- Hoen HF, Solberg B (1994) Potential and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science* 40: 429-351.
- Kaipanen T, Liski J, Pussinen A, Karjalainen T (2004) Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science and Policy* 7: 205-219.
- Keles S, Baskent EZ (2007) Modeling and analyzing timber production and carbon sequestration values of forest ecosystems: A case study. *Polish Journal of Environmental Studies* 16: 473-479.
- Kraenzel M, Castillo A, Moore T, Potvin C (2003) Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panamá. *Forest Ecology and Management* 173: 213-225.

- Liski J, Pussinen A, Pingoud K, Mäkipää T, Karjalainen T (2001) Which rotation is favorable for carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* 31:2004-2013.
- Liu G, Han S, Zhao X, Nelson JD, Wang H, Wang W (2006) Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning. *Ecological Modelling* 194: 421-428.
- Microsoft Corporation (2012) *Microsoft Visual Studio 2010*. [documento en línea]. Disponible desde Internet en:
<<http://msdn.microsoft.com/query/dev10.query?appId=Dev10IDEF1&l=ES-ES&k=k%28MSDNSTART%29&rd=true>> [con acceso el 8-01-2012].
- Nepal P, Grala RK, Grebner DL (2012) Financial feasibility of increasing carbon sequestration in harvested wood products in Mississippi. *Forest Policy and Economics* 20: 16-24.
- Osorio O. 1997. *Regímenes de espesura y sus efectos en la rentabilidad de teca (Tectona grandis L.f) en Caparo, Venezuela*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela. 98 pp.
- Pérez S, Jand R, Rubio A (2007) Modelización del secuestro de carbono en sistemas forestales: efecto de la elección de especie. *Ecología* 21: 341-352.
- Pohjola J, Valsta L (2007) Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics* 9: 789-798.
- Pukkala T, Kurttila M (2005) Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica* 39: 67 – 80.
- Raymer AK, Gobakken T, Solberg B, Hoen HF, Bergseng E (2009) A forest optimisation model including carbon flows: Application to a forest in Norway. *Forest Ecology and Management* 258: 579-589.
- Richards FJ (1959) A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10(2): 290-301.
- Seo JH, Vilčko F, Sánchez S, Kunth S, Son YM, Von Gadow K (2005) A case study of forest management planning using a new heuristic algorithm. *Tree Physiology* 25: 929 – 938.

CAPÍTULO VI

CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

En este trabajo se abordaron varios aspectos inherentes a la planificación del manejo en plantaciones forestales industriales mediante el desarrollo de modelos de optimización. Dos problemas de planificación fueron objeto de atención, la prescripción de regímenes de aclareo en un rodal y la programación de cortas en plantaciones conformadas por múltiples rodales.

Estos problemas son complejos, ya que involucran factores biológicos, económicos y ambientales que interactúan entre sí, además requieren del uso de ecuaciones no lineales para modelar el crecimiento y rendimiento de la masa forestal, dificultándose el uso de técnicas de programación matemática en la optimización. Por tal razón, se exploraron algunas técnicas heurísticas como métodos de solución de los modelos de optimización para la planificación del manejo forestal. Los resultados mostraron que los métodos heurísticos son procedimientos eficientes para encontrar buenas soluciones aunque no se pueda comprobar que sean óptimas; tanto la rapidez del proceso como la calidad de la solución obtenida son características importantes de estas técnicas. Los beneficios que aportan las heurísticas se derivan de la posibilidad de resolver problemas de manera más realista y menos rígida, comparadas con las técnicas derivadas de la programación matemática. Es así, como los métodos heurísticos tienen un enorme potencial en la resolución de problemas de planificación forestal, diversas publicaciones en las que problemas de gran dificultad son resueltos de manera eficiente, así como los resultados obtenidos en este trabajo, avalan el uso de estas técnicas. No obstante, se debe ser cuidadoso al momento de diseñar las estrategias de solución empleadas en los diferentes algoritmos heurísticos, ya que estas dependen del problema específico e influyen en el desempeño de las técnicas.

Un Algoritmo Genético se utilizó para determinar el régimen de aclareo óptimo para un rodal de teca (*Tectona grandis* L.f.), se formuló un modelo de optimización cuyas variables de decisión representan la edad en que deben efectuarse los aclareos y la intensidad de los mismos. Las decisiones se fundamentan en un modelo de crecimiento y rendimiento que permite estimar el desarrollo de un rodal en respuesta a los tratamientos realizados, así como también en los costos e ingresos que generan las cortas. El objetivo de la optimización (función objetivo) se planteó desde dos escenarios. En el primer escenario se busca maximizar los beneficios económicos provenientes de la producción de madera, cumpliendo con restricciones que obligan a mantener el área basal del rodal en un rango definido por el área basal limitante y el área basal máxima. Bajo este escenario, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El modelo permite encontrar regímenes de aclareo que maximizan los beneficios económicos, considerando densidad inicial, calidad de sitio, costos de corta, precio de la madera y tasa de interés. Por ejemplo, se obtuvo que el mejor régimen para una densidad inicial de 1111 arb ha⁻¹, calidad de sitio I y un turno de 30 años, bajo las condiciones y supuestos considerados en el análisis, incluye tres aclareos, a los 9, 13 y 18 años con intensidades del 25,1% , 28,4% y 30% del área basal, respectivamente. De la misma manera, fue posible obtener los mejores regímenes para rodales con otras características.
- En rodales de teca, un régimen de manejo que incluye aclareos produce mayores beneficios que la alternativa de no aclarar. Cuando se practican aclareos, aunque el volumen aprovechado al final del turno es menor, la madera obtenida presenta diámetros superiores, por lo que tiene mayor valor comercial para el aserrío.
- Los regímenes de aclareo que el modelo genera son sensibles a los cambios en los parámetros tasa de crecimiento, área basal limitante, área basal máxima, y a la tasa de interés, razón por la cual se deben seleccionar estos valores de la manera más precisa posible, pues influyen de manera importante en los resultados obtenidos.
- El modelo genera resultados razonables dentro de las restricciones y supuestos establecidos. El desarrollo de las diferentes variables de rodal (área basal, diámetro

del árbol medio, volumen, densidad) a lo largo del turno, bajo los regímenes de aclareo propuestos, es acorde a lo esperado en rodales de teca con las características definidas en el estudio.

- El uso de un modelo de optimización heurística puede ser útil para definir un conjunto de alternativas de aclareos, las cuales pueden ser evaluadas por un gestor forestal de acuerdo a su experiencia y a la factibilidad práctica de su aplicación.

En el segundo escenario considerado para el modelo de prescripción de aclareos, además de los beneficios económicos obtenidos de la producción de madera se incorpora el secuestro de carbono como otro objetivo de la optimización, y se omiten las restricciones de área basal con el fin de proporcionarle mayor flexibilidad al modelo. El secuestro de carbono se ha venido incluyendo en los modelos de planificación forestal, considerándolo como otra fuente de ingresos al asignarle un valor monetario. Los elevados niveles de CO₂ presentes en la atmósfera y sus consecuencias sobre el calentamiento global del planeta, los programas de pago de carbono existentes como incentivo para mitigar las emisiones, y la capacidad de los ecosistemas forestales para secuestrar y almacenar cantidades importantes de carbono, han impulsado el estudio de los flujos de carbono y su relación con los regímenes de manejo utilizados. En tal sentido, el modelo de prescripción de aclareos permitió analizar el potencial de las plantaciones de teca (a nivel de rodal) para secuestrar carbono y la influencia de los regímenes de aclareo aplicados, las conclusiones obtenidas pueden resumirse de la siguiente manera:

- Con los datos empleados y bajo los supuestos del modelo, cuando se consideran la producción de madera y el secuestro de carbono como objetivos del manejo, la madera prevalece sobre el secuestro de carbono, ya que su precio es mucho más alto, haciendo que esta tenga mayor peso en la función objetivo del modelo. Por lo tanto, para un precio de carbono de 10 \$tC⁻¹ y los precios de la madera utilizados, los cuales oscilan entre 53 y 400 \$m⁻³ según el diámetro, no hay diferencias entre los regímenes de aclareo que consideran la madera como único producto o si se incluye el secuestro de carbono como un objetivo adicional. Para que sea rentable hacer cambios en los planes

de manejo en función de incrementar el secuestro de carbono, el precio de este debe ser por lo menos 40 \$tC⁻¹.

- Si el manejo se orienta únicamente al secuestro de carbono, el mejor régimen es aquel que no incluye aclareos, y en caso de incluirlos, estos se prescriben a edades más tardías y a intensidades menores, en comparación a los regímenes que incluyen la producción de madera en la optimización.
- El régimen de aclareos influye en la capacidad de un rodal de teca para secuestrar y almacenar carbono. En las condiciones experimentales consideradas en este estudio, la tasa de secuestro de carbono varía entre 3,2 y 5,4 tC ha⁻¹año⁻¹, y al momento del turno (30años) se ha logrado almacenar entre 87,2 y 145,9 tC ha⁻¹ en árboles en pie y en productos forestales, dependiendo del régimen de aclareos aplicado y considerando la producción de madera como uno de los objetivos del manejo.
- La tasa de crecimiento, la tasa de interés y el precio de la madera, son las variables de entrada que más influencia tienen en la determinación del régimen óptimo de aclareos cuando se consideran el secuestro de carbono y la producción de madera, ya que el modelo se mostró bastante sensible a cambios en estas variables.

El problema de planificación del aprovechamiento en una plantación de múltiples de rodales también fue planteado como un modelo de optimización heurística. El modelo permitió obtener un plan de cortas para la plantación, que señala cuáles son los rodales que deben ser aclareados o aprovechados en su totalidad en cada año de un período de planificación. El objetivo de la optimización fue maximizar los beneficios económicos que se obtienen de la producción de madera y el secuestro de carbono. Tomando en cuenta estos objetivos, el modelo asigna a cada rodal un régimen de aclareo, seleccionado entre los que producen mayores beneficios, y determina la edad de la corta final, tomando en cuenta que en cada año existe una cuota de producción que debe ser satisfecha.

El modelo está compuesto de dos sub-modelos, el primero utiliza un Algoritmo Genético para generar los mejores regímenes de aclareo para cada rodal de acuerdo a sus características (densidad inicial, calidad de sitio), para ello se efectúan diferentes corridas

del algoritmo, en las cuales se generan varios regímenes sub-óptimos. El segundo sub-modelo usa la técnica heurística Recocido Simulado para asignar a cada rodal de la plantación uno de los regímenes de aclareo generados por el sub-modelo 1 y determina también la edad del turno, considerando las restricciones operativas del problema. Este enfoque dio buenos resultados, ya que permitió integrar dos niveles de resolución en la planificación: nivel rodal (prescripción de aclareos) y nivel bosque (programación de cortas); al ser aplicado a una plantación hipotética de teca de 200 rodales fue capaz de encontrar una solución en pocos segundos. En el caso de estudio analizado, el modelo fue útil para concluir lo siguiente:

- El modelo desarrollado permite generar un plan de cortas para una plantación conformada por múltiples rodales de manera eficiente. Puede manejar un número considerable de rodales, y aún así los tiempos de ejecución son bastante razonables (entre 45 y 65 segundos, según los objetivos de manejo considerados en una corrida).
- El plan de cortas para una plantación se ve afectado por los objetivos del manejo. Cuando el secuestro de carbono tiene prioridad, los planes incluyen menos aclareos, aclareos más tardíos y a intensidades menores, y turnos más largos, comparados a los planes generados cuando la producción de madera se incluye como un objetivo.
- La producción de madera y el secuestro de carbono son dos objetivos que entran en conflicto. Los planes de manejo que buscan obtener los mayores beneficios provenientes de la producción de madera no son aquellos que más favorecen el secuestro de carbono. Por su parte, los planes de manejo que tienen como finalidad incrementar los beneficios del secuestro de carbono, disminuyen considerablemente los beneficios de la producción de madera.
- En el caso específico de la teca, no es rentable orientar el manejo únicamente al secuestro de carbono, ya que la madera tiene un alto valor en el mercado. En plantaciones de otras especies de menor valor comercial, pudiera ser más atractivo desde el punto de vista financiero, implementar planes de manejo que incrementen el secuestro de carbono.

- Los resultados mostraron que incluso después de la cosecha, cantidades considerables de carbono pueden mantenerse almacenadas por largos períodos de tiempo en los productos forestales obtenidos de la teca. Si se considera un plan de replantación a varios turnos, las plantaciones forestales pueden convertirse en sistemas de fijación y almacenamiento continuos de carbono.
- Aún cuando las plantaciones de teca tengan como principal finalidad la producción de madera para su aprovechamiento industrial, estas tienen potencial para el secuestro y almacenamiento de carbono, debido a su rápido crecimiento y a los bienes durables que pueden obtenerse de la madera. Por tal razón, los propietarios forestales pueden considerar este servicio ambiental como una fuente adicional de ingresos.

El modelo que se presenta en esta tesis doctoral, puede servir de ayuda para manejar plantaciones de teca a pequeña y gran escala, ya que permite obtener regímenes óptimos de aclareo para un rodal y generar planes de aprovechamiento para múltiples rodales. Aunque en la actualidad no existen en Venezuela plantaciones muy extensas de teca, cabe la posibilidad de que a futuro se planten más áreas con esta especie, ya que las condiciones climáticas del país lo permiten y la demanda mundial por madera fina es permanente, siendo estas plantaciones proyectos atractivos para los inversionistas forestales.

Aunque el modelo se orientó al manejo de plantaciones de teca, puede ser reprogramado para manejar otras especies forestales (por ejemplo, pino o eucalipto), ajustando las ecuaciones de crecimiento y los parámetros relacionados a la especie. Asimismo, algunas restricciones o supuestos pueden ser adaptados a otras condiciones operativas. Durante el desarrollo de esta tesis doctoral, se ha ganado conocimiento en el uso de los modelos de optimización, las técnicas de solución y su aplicación en la planificación del manejo, lo que facilitaría la adecuación del modelo a otras situaciones particulares del sector forestal.

Por otra parte, se recomienda continuar trabajando en el modelo propuesto con el fin de mejorarlo. Un aspecto que puede refinarse es el modelo de crecimiento y rendimiento para teca, en el cual se fundamentan las decisiones del modelo de optimización. Los

parámetros de las ecuaciones de crecimiento, así como también la ecuación de mortalidad, deben afinarse con el fin de incrementar la precisión del modelo. Actualmente, en el Grupo Genética y Silvicultura (GENSIL) de la Facultad de Ciencias Forestales – ULA, se está desarrollando un modelo de simulación del crecimiento que trata de representar la dinámica en las plantaciones de teca de manera más precisa. Una vez que este modelo de simulación esté validado, se puede incorporar en el modelo de optimización desarrollado en esta tesis.

Para el cálculo del flujo de carbono en el modelo, sería conveniente contar con ecuaciones de biomasa para teca, estas pueden ser generadas en trabajos futuros. También sería importante estimar con mayor exactitud la proporción de desperdicios, y los porcentajes de los distintos productos que pueden obtenerse de la madera cosechada a partir de su clase diamétrica.

En próximas investigaciones también se puede ampliar el modelo de prescripción de aclareos a nivel de rodal, de tal manera que en vez de asumir un valor fijo para el turno (en este trabajo el turno es de 30 años), permita que este sea variable. Otra posible modificación del modelo de aclareos es que, además de especificar la edad e intensidad de los raleos, determine el turno óptimo; de esta manera, se resolverían dos problemas a nivel de rodal en un mismo modelo.

En cuanto al uso de técnicas heurísticas, un tema de investigación es la comparación de métodos para resolver el modelo de prescripción de aclareos. En esta tesis se usó Algoritmos Genéticos, pero se sabe que heurísticas como Recocido Simulado y Búsqueda Tabú, no se han empleado para tal fin. Por tal razón, es interesante la aplicación de otras heurísticas para solucionar el modelo a nivel de rodal, a fin de estudiar el desempeño de las mismas en este problema particular.

En el futuro, se recomienda mejorar la interfaz del modelo de planificación, tanto a nivel de rodal como en múltiples rodales, de tal manera que permita mayor interacción con el usuario. Sería deseable que los gráficos concernientes a las distintas variables que el

modelo calcula (ej. área basal, diámetro, volumen, densidad, flujo de carbono, carbono almacenado) se puedan crear desde el modelo. Igualmente, la distribución espacial de los rodales a cosechar en un año debería poder observarse desde el modelo de optimización, sin necesidad de usar un SIG de manera aislada. La interfaz de usuario actual, aunque fue diseñada para utilizar el modelo principalmente con fines de investigación, hace uso de componentes gráficos que facilitan la entrada de datos y la visualización de los resultados, por lo que puede ser empleada por cualquier persona interesada; sin embargo, se cree conveniente hacer las mejoras antes señaladas para facilitar su uso.

Un problema que puede ser objeto de investigaciones futuras, es la inclusión de planes de replantación en el modelo de planificación del manejo en plantaciones con múltiples rodales. La replantación implica tomar decisiones referentes a qué áreas deben ser plantadas nuevamente después de su aprovechamiento y el momento en que el establecimiento debe hacerse, para garantizar el manejo sustentable del bosque.

Este trabajo, mostró el potencial que tienen los modelos de optimización en la planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales con fines industriales. Estos modelos pueden ser de gran ayuda en los procesos de toma de decisiones, constituyendo una herramienta que puede brindar información oportuna y facilita la evaluación de distintos escenarios de manejo, complementando así la experiencia de los gestores forestales.

ANEXOS

ANEXO A

Interfaz del modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo

Datos de entrada

Datos del rodal

Calidad de sitio:

I
 II

Densidad inicial de plantación:

1111 arb/ha
espaciamiento 3 x 3 m

1600 arb/ha
espaciamiento 2.5 x 2.5 m

Datos financieros

Costo de la corta (aclareo y corta final) en \$/m³: 14.24

Tasa de interés (%): 10

Precio de la madera rolliza en \$/m³:

DAP (cm)	\$/m ³
< 10	0
[10, 15)	53
[15, 20)	77
[20, 25)	155
[25, 30)	232
[30, 40)	310
>= 40	400

Opciones del modelo

Número de aclareos: 3

Iniciar búsqueda

Cambiar los parámetros del algoritmo genético

Salir

Parámetros del Algoritmo Genético

Parámetros del algoritmo genético

Tamaño de la Población: 50

Probabilidad de cruzamiento: 1

Probabilidad de mutación: 0,01

Número máximo de iteraciones: 100

Guardar cambios

Regresar

A.1 Ventanas para introducir los datos de entrada del modelo

Resultados del modelo

Desarrollo del rodal

Régimen de aclareo:

Primer aclareo
 Edad = 9
 Intensidad = 28,2 %

Segundo aclareo
 Edad = 17
 Intensidad = 11 %

Tercer aclareo
 Edad = 22
 Intensidad = 38,5 %

Valor objetivo (VAN):
 VAN = 5052,46 \$/ha

	Edad	AB inicial	N inicial	AB aclareada	N aclareados	AB final	N final	Dam	Altura	VSC inicial	VSC aclareado	VSC final	Diam aclareado	Diam final	Alt aclareada	Alt final	VCC inicial
▶	0	0	1111	0	0	0	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	1111	0	0	0	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1111	0	0	0	1111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	4,4	944	0	0	4,4	944	7,7	10,8	17,4	0	17,4	0	7,7	0	10,8	25,0
	4	8,7	944	0	0	8,7	944	10,8	15,0	46,2	0	46,2	0	10,8	0	15,0	64,3
	5	12,5	944	0	0	12,5	944	13,0	17,2	74,9	0	74,9	0	13,0	0	17,2	102,6
	6	15,9	944	0	0	15,9	944	14,6	18,5	101,3	0	101,3	0	14,6	0	18,5	137,5
	7	18,8	944	0	0	18,8	944	15,9	19,4	124,9	0	124,9	0	15,9	0	19,4	168,4
	8	21,4	944	0	0	21,4	944	17,0	20,1	145,8	0	145,8	0	17,0	0	20,1	195,7
	9	23,6	944	6,6	337	16,9	607	17,8	20,6	164,1	44,0	120,4	15,8	18,8	19,4	21,1	219,4
	10	18,7	607	0	0	18,7	607	19,8	21,6	135,6	0	135,6	0	19,8	0	21,6	179,9
	11	20,4	607	0	0	20,4	607	20,7	22,0	149,6	0	149,6	0	20,7	0	22,0	197,9
	12	21,9	607	0	0	21,9	607	21,4	22,3	162,6	0	162,6	0	21,4	0	22,3	214,5
	13	23,3	607	0	0	23,3	607	22,1	22,6	174,4	0	174,4	0	22,1	0	22,6	229,6
	14	24,5	607	0	0	24,5	607	22,7	22,9	185,3	0	185,3	0	22,7	0	22,9	243,5
	15	25,7	607	0	0	25,7	607	23,2	23,1	195,3	0	195,3	0	23,2	0	23,10	256,2
	16	26,7	607	0	0	26,7	607	23,7	23,2	204,4	0	204,4	0	23,7	0	23,2	267,7
	17	27,7	607	3,0	87	24,6	520	24,1	23,4	212,7	22,4	190,3	21,1	24,5	22,2	23,5	278,3
	18	25,5	520	0	0	25,5	520	25,0	23,7	198,1	0	198,1	0	25,0	0	23,7	258,4
	19	26,4	520	0	0	26,4	520	25,4	23,8	205,3	0	205,3	0	25,4	0	23,8	267,6

A.2 Salida del modelo de aclareos

ANEXO B

Interfaz del modelo de optimización para prescribir regímenes de aclareo con consideraciones de carbono

Datos de entrada

Datos del rodal

Calidad de sitio:

I
 II

Densidad inicial de plantación:

1111 arb./ha
espaciamiento 3 x 3 m
 1600 arb./ha
espaciamiento 2.5 x 2.5 m

Datos financieros

Costo de la corta (aclareo y corta final) en \$/m3: 14.24

Tasa de interés (%): 10

Precio de la madera rolliza en \$/m3:

DAP (cm)	\$/m3
< 10	0
[10, 15)	53
[15, 20)	77
[20, 25)	155
[25, 30)	232
[30, 40)	310
>= 40	400

Precio del carbono (\$/t): 10

Opciones del modelo

Número de aclareos: 0

Productos del rodal:

Madera
 Carbono
 Madera y Carbono

Iniciar búsqueda

Cambiar los parámetros del algoritmo genético

B.1. Ventana para introducir los datos de entrada del modelo

Resultados del modelo

Desarrollo del rodal

Régimen de aclareo:

Primer aclareo
 Edad = 11
 Intensidad = 41 %

Segundo aclareo
 Edad = 16
 Intensidad = 11,4 %

Tercer aclareo
 Edad = 24
 Intensidad = 27 %

Valor objetivo (VAN):
 VAN = 7492,54 \$/ha

	Diam aclareado	Diam final	Alt aclareada	Alt final	VCC inicial	VCC final	Captura	Emisiones	Flujo Carbono
3	0	944	0	10,8	25,0	25,0	37,2	0	37,2
4	0	10,8	0	15,0	64,3	64,3	58,5	0	58,5
5	0	13,0	0	17,2	102,6	102,6	57,0	0	57,0
6	0	14,6	0	18,5	137,5	137,5	51,9	0	51,9
7	0	15,9	0	19,4	168,4	168,4	46,1	0	46,1
8	0	17,0	0	20,1	195,7	195,7	40,5	0	40,5
9	0	17,8	0	20,6	219,4	219,4	35,4	0	35,4
10	0	18,5	0	21,0	240,1	240,1	30,7	0	30,7
11	17,2	20,9	20,2	22,1	258,0	155,9	26,6	32,3	-5,6
12	0	21,8	0	22,5	172,0	172,0	23,9	21,9	2,0
13	0	22,6	0	22,8	187,1	187,1	22,4	17,6	4,7
14	0	23,4	0	23,1	201,2	201,2	20,9	14,9	6,0
15	0	24,1	0	23,4	214,3	214,3	19,6	15,2	4,3
16	21,5	25,2	22,4	23,8	226,6	201,6	18,3	20,8	-2,5
17	0	25,9	0	24,0	213,1	213,1	17,1	16,4	0,6
18	0	26,5	0	24,1	223,9	223,9	16,1	13,8	2,3
19	0	27,0	0	24,3	234,2	234,2	15,2	11,7	3,4
20	0	27,5	0	24,5	243,8	243,8	14,3	10,5	3,8
21	0	28,0	0	24,6	252,9	252,9	13,5	9,0	4,5
22	0	28,4	0	24,7	261,5	261,5	12,7	7,7	5,0

B.2. Salida del modelo de aclareos con secuestro de carbono

ANEXO C

Interfaz del modelo de optimización para el manejo de plantaciones forestales Módulo: Prescripción de aclareos



C.1 Ventana inicial del modelo de planificación del manejo en plantaciones forestales

Permite seleccionar el módulo o sub-modelo con el que se desea trabajar: prescripción de aclareos o plan de aprovechamiento.



C.2 Ventana inicial del módulo prescripción de aclareos

El botón “Buscar un régimen de aclareos” permite aplicar el modelo para encontrar el mejor régimen de aclareos para un rodal, dependiendo de los productos considerados (madera y/o secuestro de carbono) se aplica el modelo del capítulo III o el modelo del capítulo IV, y su interfaz corresponde a las ventanas de los anexos B.1 y B.2.

El botón “Generar varios regímenes de aclareo” determina las mejores alternativas de aclareo para un rodal y genera un archivo de datos con los regímenes encontrados, el cual se utiliza como entrada en el modelo de aprovechamiento. Al seleccionar esta opción se abre la ventana que se muestra en el anexo C.3.

Datos de entrada
X

Datos del rodal

Calidad de sitio:

I
 II

Densidad inicial de plantación:

1111 arb/ha
espaciamiento 3 x 3 m

1600 arb/ha
espaciamiento 2.5 x 2.5 m

Datos financieros

Costo de la corta (aclareo y corta final) en \$/m³:

Tasa de interés (%):

Precio de la madera rolliza en \$/m³:

DAP (cm)	\$/m ³
< 10	0
[10, 15)	53
[15, 20)	77
[20, 25)	155
[25, 30)	232
[30, 40)	310
>= 40	400

Precio del carbono (\$/t):

Opciones del modelo

Productos del rodal:

Madera
 Carbono
 Madera y Carbono

N° de alternativas deseadas en cada escenario de manejo:

1 aclareo:
2 aclareos:
3 aclareos:
4 aclareos:

Iniciar búsqueda

Cambiar los parámetros del algoritmo genético

C.3. Ventana para introducir datos de entrada necesarios para generar varios regimenes de aclareo para un rodal

Resultados

Mejores regímenes de aclareo encontrados por el modelo:

	N° aclareos	E1	I1 %	E2	I2 %	E3	I3 %	E4	I4 %	VAN
▶	0	-	-	-	-	-	-	-	-	2260,594
	1	11	49,7	-	-	-	-	-	-	4810,91
	1	12	55,2	-	-	-	-	-	-	4588,01
	2	11	46,2	22	34,4	-	-	-	-	5580,158
	2	10	32,8	16	33,3	-	-	-	-	5668,776
	3	7	20,5	13	26,1	17	23,6	-	-	7288,458
	3	7	16,2	11	32,9	20	35,6	-	-	7935,042
	4	12	32,9	16	28,3	22	28,1	27	21,5	6133,405
	4	10	43,9	18	30,6	23	24,9	27	13,8	6927,192
*										

E_i : edad del aclareo i
 I_i : intensidad del aclareo i

C.4 Ventana que indica los mejores regímenes de aclareo para un rodal

ANEXO D

Ejemplo de archivo de texto que contiene los datos sobre los rodales necesarios para ejecutar el modelo de planificación del manejo para una plantación

```
1;0;50;1;1111;250;9500
2;0;50;1;1111;750;9500
3;0;50;1;1111;1250;9500
4;0;50;1;1600;1750;9500
5;0;50;1;1600;2250;9500
6;0;50;2;1111;5250;9500
7;0;50;2;1111;5750;9500
8;0;50;2;1111;6250;9500
9;0;50;2;1600;6750;9500
10;0;50;2;1600;7250;9500
11;1;50;1;1111;250;8500
12;1;50;1;1111;750;8500
13;1;50;1;1111;1250;8500
14;1;50;1;1600;1750;8500
15;1;50;1;1600;2250;8500
16;1;50;2;1111;5250;8500
17;1;50;2;1111;5750;8500
18;1;50;2;1111;6250;8500
19;1;50;2;1600;6750;8500
20;1;50;2;1600;7250;8500
21;2;50;1;1111;250;7500
22;2;50;1;1111;750;7500
23;2;50;1;1111;1250;7500
24;2;50;1;1600;1750;7500
25;2;50;1;1600;2250;7500
26;2;50;2;1111;5250;7500
27;2;50;2;1111;5750;7500
28;2;50;2;1111;6250;7500
29;2;50;2;1600;6750;7500
30;2;50;2;1600;7250;7500
```

Cada fila de este archivo contiene los siguientes datos para un rodal (en orden y separados por ;): número de identificación, año de plantación, área, calidad de sitio, densidad inicial, coordenada en el eje X (m) y coordenada en el eje Y (m). Este archivo se puede crear al guardar una hoja de Excel como archivo tipo "CSV (delimitado por comas)"

ANEXO E

Interfaz del modelo de optimización para el manejo de plantaciones forestales Módulo: Planificación del aprovechamiento

Datos de entrada

Productos de la plantación

- Madera
- Carbono
- Madera y Carbono

Datos financieros

Costo de la corta (aclareo y corta final) en \$/m3:

Tasa de interés (%):

Precio de la madera rolliza en \$/m3:

DAP (cm)	\$/m3
< 10	<input type="text" value="0"/>
[10, 15)	<input type="text" value="53"/>
[15, 20)	<input type="text" value="77"/>
[20, 25)	<input type="text" value="155"/>
[25, 30)	<input type="text" value="232"/>
[30, 40)	<input type="text" value="310"/>
>= 40	<input type="text" value="400"/>

Precio del carbono (\$/t):

Archivos de datos

Datos de los rodales (año de plantación, área, calidad de sitio, espaciamiento):

Alternativas de aclareo para calidad de sitio I y espaciamiento 3 x 3:

Alternativas de aclareo para calidad de sitio I y espaciamiento 2,5 x 2,5:

Alternativas de aclareo para calidad de sitio II y espaciamiento 3 x 3:

Alternativas de aclareo para calidad de sitio II y espaciamiento 2,5 x 2,5:

Opciones del modelo

Incluir agregación espacial

Parámetros del recocido simulado

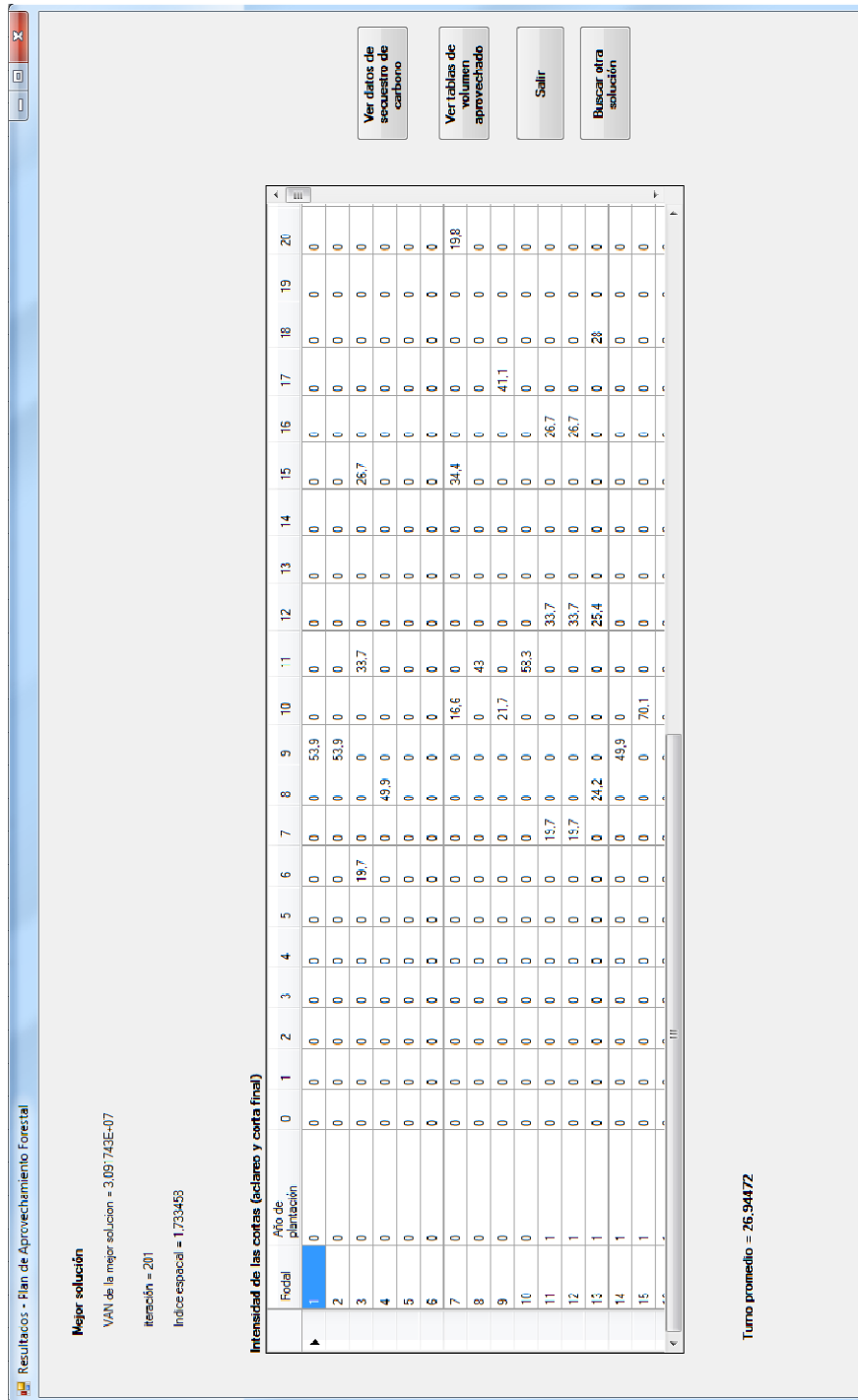
Temperatura inicial:

Número de iteraciones en cada nivel de temperatura:

Número máximo de iteraciones del algoritmo:

Tasa de disminución de la temperatura (alfa):

E.1 Ventana para introducir los datos de entrada al modelo de planificación del aprovechamiento



E.2 Ventana que muestra el mejor programa de cortas encontrado por el modelo

Volúmenes aprovechados

Volumen extraído (superior a 20 cm DAP) en m3

Rodal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1704,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1328,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	327,6	0	0	0	789,9	0	0	0	0	0	1646,5	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720,2	0	0	0	0	626,8	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2562,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	972,7	0	0	0	0	0	0	1742,...
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	187,0	0	0	0	440,5	0	0	0	0	0	1400,9	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1138,3	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	327,6	0	0	0	789,9	0	0	0	0	0	1646,...
12	0	0	0	0	0	0	0	0	214,5	0	0	0	0	1113,6	0	0	0	1321,9	0	0

Volumen total extraído en m3

Rodal	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4262,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3321,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1424,4	0	0	0	1974,9	0	0	0	0	0	0	2533,1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	3131,4	0	0	0	0	0	1567,0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6406,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2431,8	0	0	0	0	0	0	0	2680,5
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	813,3	0	0	0	1915,2	0	0	0	0	0	0	3502,3	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4949,2	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1424,4	0	0	0	1974,9	0	0	0	0	0	0	2533,1
12	0	0	0	0	0	0	0	932,9	0	0	0	0	2784,1	0	0	0	2033,8	0	0	0

E.3 Tablas de salida que indican los volúmenes cosechados

Secuestro de carbono en la plantación

Flujo de carbono en la plantación

	Año	Captura (tonC)	Emisiones (tonC)	Flujo Carbono (tonC)	Carbono total acumulado (tonC)
▶	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0
	3	18684,57	0	18684,57	18684,57
	4	48432,51	0	48432,51	67117,08
	5	76843,66	0	76843,66	143960,7
	6	121756,9	249,1019	121507,8	265468,5
	7	174700,8	2509,062	172191,7	437660,3
	8	222225,4	8862,139	213363,3	651023,5
	9	263439,7	12614,28	250825,5	901848,9
	10	299147,1	16988,94	282158,3	1184007
	11	332703,9	25252,71	307451,2	1491459
	12	369203,1	40863	328340	1819799
	13	403338,5	54358,74	348979,6	2168778
	14	387835	65189,07	322645,8	2491424
	15	344630,8	77802,29	266828,4	2758252
	16	301075,1	93613,87	207461,3	2965714
	17	261935,5	106744,5	155190,8	3120904
	18	229732,5	115118	114614,5	3235519
	19	203619,6	128713,6	74905,89	3310425
	20	183816,2	128511,8	55304,41	3365729

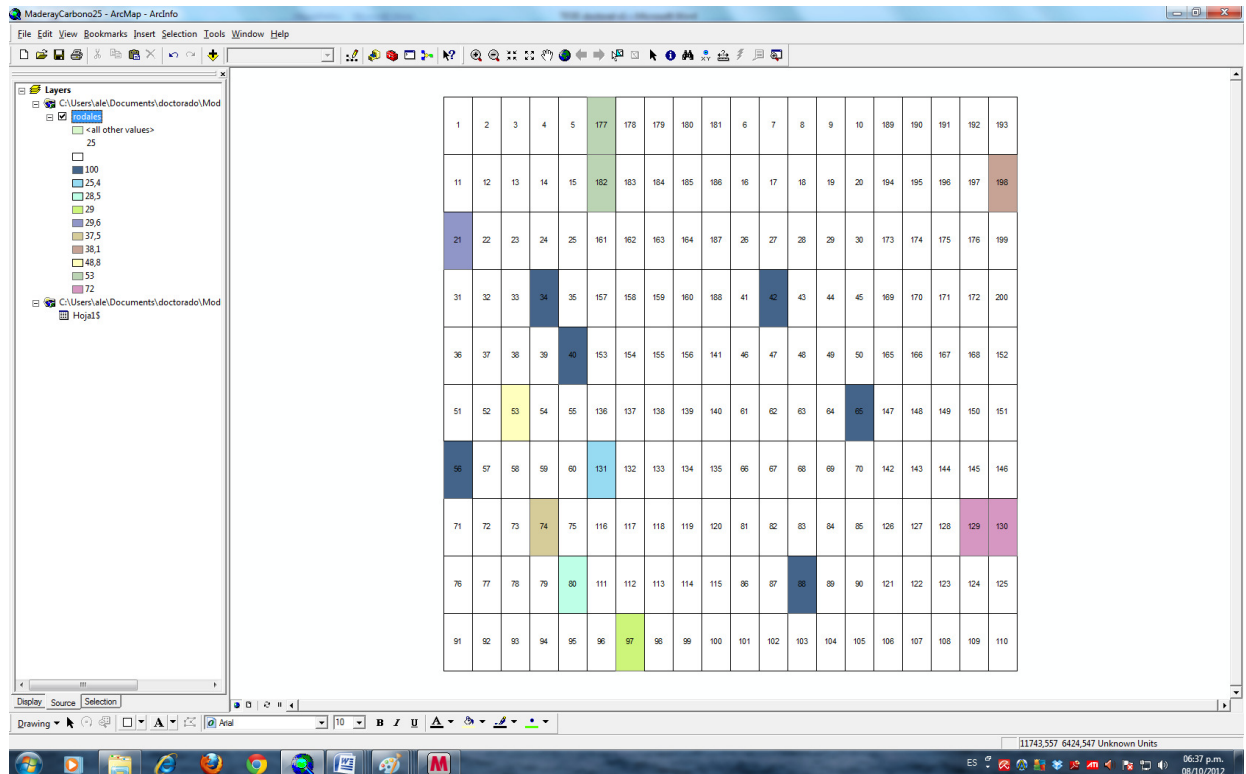
Cerrar

Salir del programa

E.4 Tabla de salida que muestra los valores del secuestro de carbono

ANEXO F

Visualización del programa de cortas en un Sistema de Información Geográfica



F.1. Rodales que deben ser cortados en un año del período de planificación