

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes

Departamento de Ingeniería Forestal



TESIS DOCTORAL

**Evaluación de prácticas silvícolas en plantaciones de
Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden en Chile**

Autor: Fernando Muñoz Sáez
Director: Miguel Ángel Herrera Machuca

Córdoba (España), noviembre de 2005

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes
Departamento de Ingeniería Forestal



**Evaluación de prácticas silvícolas en plantaciones de
Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden en Chile**

Tesis Doctoral presentada por Fernando Muñoz Sáez, en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba, dirigida por el Dr. Miguel Ángel Herrera Machuca.

El Director:

El Doctorando:

Miguel Ángel Herrera Machuca, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Forestal de la Universidad de Córdoba, de acuerdo al artículo 34 de las Normas Regulatoras de Doctorado de esta Universidad.

AUTORIZA a Don Fernando Muñoz Sáez, Ingeniero Forestal, para la presentación del trabajo que con el título “EVALUACIÓN DE PRÁCTICAS SILVÍCOLAS EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus nitens* (DEANE & MAIDEN) MAIDEN EN CHILE” ha sido realizado bajo mi dirección como Tesis para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba.

Córdoba, España, a 30 noviembre de 2005.

Fdo. Miguel Ángel Herrera Machuca

A Nidia, mi esposa
A Teresa y Esteban, mis hijos
A mis padres, Amalia (†1998) y Eduardo

Agradecimientos

Quisiera expresar mis agradecimientos a las personas e instituciones que de una u otra forma hicieron posible mis estudios de doctorado. Sin duda olvidaré a algunas de ellas, desde ya mis disculpas.

En primer lugar deseo agradecer a mi esposa Nidia, que me ha acompañado y apoyado incondicionalmente. A mis hijos Teresa y Esteban, a quienes he visto crecer juntos con mis estudios. A ellos mi gratitud y amor.

A mi Director Dr. Miguel Ángel Herrera, por su gran disposición, dedicación y profesionalismo. Sus certeros consejos y orientación me permitieron desarrollar con éxito esta tesis. Sin su apoyo mis estudios de doctorado no hubieran sido posibles. Agradezco su hospitalidad y amistad que me ha brindado siempre.

A mi colega y amigo Dr. Miguel Espinosa B. quién me inició en el mundo de la investigación y docencia, agradezco su amistad, ayuda y oportunos consejos.

A la Agencia Española de Cooperación Internacional, Universidad de Concepción (Chile) y Universidad de Córdoba (España), instituciones que financiaron mis estudios de doctorado y posibilitaron que durante distintos periodos de mi formación permaneciera en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes de la Universidad de Córdoba.

A mi colega y amigo Dr. Fernando Drake A., por su constante apoyo y disposición a colaborar en el desarrollo de esta tesis.

Al personal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, en especial del Departamento de Silvicultura, que en distintos momentos me prestaron su colaboración. A Forestal Mininco S.A. y Bosques Arauco S.A., empresas que dieron las facilidades para el desarrollo del trabajo de campo.

A los profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Dr. Jesús López, Dr. José Luis Ayuso, Dr. Rafael Navarro y Dra. Pilar Fernández por su

hospitalidad y apoyo durante el desarrollo de mis estudios. A la Dra. Inmaculada Bocio por su colaboración y amistad.

A mis compañeros de doctorado, en especial a Blanca (Venezuela), Nicoleta (Rumania), Fernando (Chile), Carlos (Colombia), Aleila (Colombia), Maxym (Ucrania), Niccolo (Italia), Roberto (España), Miguel (España). También al grupo de doctorandos del sótano de la torre de la Escuela por su colaboración y apoyo.

Aclaraciones

A fin de evitar confusiones, se ha privilegiado el uso de terminología forestal internacional. A continuación se entrega un resumen de los términos utilizados en el texto y su equivalente en España.

Términos en el texto	Terminología en España
Árboles por hectárea	Pies por hectárea
Dap (diámetro altura pecho)	DN (diámetro normal)
Espaciamiento	Marco de plantación
Esquema de manejo	Esquema de gestión
Prácticas silvícolas	Prácticas selvícolas
Raleos	Claras
Silvicultura	Selvicultura
Sitio	Estación forestal

ÍNDICE GENERAL

	Página
1. CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN GENERAL.....	2
1.1. MARCO GENERAL	2
1.2. ANTECEDENTES CIENTÍFICOS GENERALES DE LA ESPECIE	6
1.2.1. DISTRIBUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS	8
1.2.2. PRODUCCIÓN DE PLANTAS Y ESTABLECIMIENTO	11
1.2.3. MANEJO Y RENDIMIENTO DE PLANTACIONES	20
1.2.4. CAPACIDAD DE REGENERACIÓN.....	30
1.2.5. DAÑOS BIÓTICOS	33
1.2.6. PROPIEDADES Y UTILIZACIÓN DE LA MADERA	36
1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	45
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS	47
2. CAPÍTULO 2 - EFECTO DE LA PODA Y EL RALEO EN EL CRECIMIENTO Y FORMA DEL FUSTE DE <i>Eucalyptus nitens</i> (DEANE & MAIDEN) MAIDEN	50
2.1. RESUMEN	50
2.2. INTRODUCCIÓN	52
2.3. METODOLOGÍA	53
2.3.1. ÁREA DE ESTUDIO	53
2.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES.....	55
2.3.3. ANÁLISIS DE DATOS.....	56
2.4. RESULTADOS.....	57
2.5. DISCUSIÓN	64
2.6. CONCLUSIONES	68
3. CAPÍTULO 3 - EFECTO DE LA PODA Y EL RALEO EN LA BIOMASA AÉREA DE <i>Eucalyptus nitens</i> (DEANE & MAIDEN) MAIDEN.....	70
3.1. RESUMEN	70

3.2.	INTRODUCCIÓN	72
3.3.	METODOLOGÍA	73
3.3.1.	ÁREA DE ESTUDIO	73
3.3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES.....	73
3.3.3.	ANÁLISIS DE DATOS.....	74
3.4.	RESULTADOS.....	75
3.5.	DISCUSIÓN	83
3.5.1.	BIOMASA AÉREA.....	83
3.5.2.	FUNCIONES ALOMÉTRICAS.....	86
3.6.	CONCLUSIONES	86
4.	CAPÍTULO 4 - EFECTO DE LA PODA Y EL RALEO EN EL ÁREA FOLIAR DE <i>Eucalyptus nitens</i> (DEANE & MAIDEN) MAIDEN	88
4.1.	RESUMEN	88
4.2.	INTRODUCCIÓN	90
4.3.	METODOLOGÍA	91
4.3.1.	ÁREA DE ESTUDIO	91
4.3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES.....	91
4.3.3.	ANÁLISIS DE DATOS.....	92
4.4.	RESULTADOS.....	93
4.5.	DISCUSIÓN	103
4.5.1.	ÁREA FOLIAR PROYECTADA	103
4.5.2.	ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR	105
4.5.3.	ÁREA FOLIAR ESPECÍFICA.....	107
4.5.4.	FUNCIONES ALOMÉTRICAS.....	108
4.6.	CONCLUSIONES	109
5.	CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN GENERAL.....	112
6.	CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES GENERALES.....	123

BIBLIOGRAFÍA..... 127

ANEXOS 154

ANEXO A.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.. 154

ANEXO A.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PARCELAS ESTABLECIDAS 158

ANEXO A.3. DESCRIPCIÓN DE MEDICIONES Y PROCEDIMIENTOS DE
CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE BIOMASA AÉREA..... 160

ANEXO A.4. DISTRIBUCIÓN DEL PESO SECO DE LOS COMPONENTES DE
LOS ÁRBOLES 165

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1. Rodales de <i>E. nitens</i> creciendo en Chile. Las fotos de la izquierda corresponden al Proyecto Ñadis que desarrolla el Instituto Forestal (Región de los Lagos). El rodal de la derecha corresponde a un ensayo de poda y raleo establecido en Los Álamos (Región del Bío Bío).....	7
Figura 1.2. Distribución natural de <i>E. nitens</i> en el sudeste de Australia. Se indican las procedencias más conocidas (Dutkowski <i>et al.</i> , 2001).	9
Figura 1.3. Distribución de las plantaciones de <i>E. nitens</i> en Chile.....	11
Figura 1.4. Producción de plantas en Chile en la modalidad contenedor (García <i>et al.</i> , 2000).13	13
Figura 1.5. Actividades de establecimiento de plantaciones de <i>E. nitens</i> . La superficie de la figura posee control de malezas y subsolado superficial (Pérez y Montesinos, 1992).	18
Figura 1.6. Plantación de <i>E. nitens</i> con espaciamiento rectangular creciendo en la precordillera andina de la Región del Bío Bío (Chile) (Lignum, 2003).	19
Figura 1.7. Intervención de poda alta (izquierda) y raleo comercial (derecha) en plantaciones de <i>E. nitens</i> (Forestal Mininco S.A., 2003).	25
Figura 1.8. Rodal de <i>E. nitens</i> de 14 años ubicado en la zona de Arauco, Chile.....	27
Figura 1.9. A la derecha, mancha de la pudrición en un corte horizontal de la troza (Infor, 2004b). A la izquierda pudrición en la base de la rama podada de <i>E. nitens</i> y su expansión al cilindro nudoso (Wiseman <i>et al.</i> , 2003).	29
Figura 1.10. Regeneración de <i>E. nitens</i> a campo abierto (izquierda) y detalle de la distribución de rebrotes (derecha), en tocones remanentes de cosecha en la zona precordillera andina de la Región del Bío Bío.	31
Figura 1.11. Ataque de <i>Chilecomadia valdiviana</i> (izquierda) a árboles de <i>E. nitens</i> (Forestal Mininco S.A, 2003) y larvas (derecha) (Infor, 2004).....	35
Figura 1.12. Bolsa de quino ubicada en la base de una rama de <i>E. nitens</i>	37

Figura 1.13. Diferencias visuales que ayudan a reconocer la madera de <i>E. nitens</i> . A la izquierda, el rasgado típico en un corte transversal y a derecha, sus anillos de crecimiento claramente definidos (Quiñónez <i>et al.</i> , 2005).	41
Figura 1.14. Anillamiento del árbol antes del volteo (izquierda) y aplicación de biocidas en árboles en pie (Infor, 2004b).	43
Figura 1.15. Chapa obtenida de árboles de <i>E. nitens</i> podado de 21 años de edad (Infor, 2004b).	44
Figura 2.1. Ubicación general del ensayo.	54
Figura 2.2. Efecto de diferentes densidades residuales en la respuesta de las variables de crecimiento y forma. (▲) Todos los árboles (1.100 arb ha ⁻¹), (■) mayores 800 arb ha ⁻¹ , (●) mayores 400 arb ha ⁻¹ . Letras diferentes en cada edad indican diferencias significativas (Tukey, p<0,05). La selección de los árboles de mayor dap se realizó en base a la distribución diamétrica existente al año 1995. En el gráfico de volumen por árbol, a la edad de 6 años, letra <i>a</i> le corresponde el símbolo ▲, a las letras <i>a,b</i> el símbolo ■ y a la letra <i>b</i> el símbolo ●.....	61
Figura 2.3. Número de árboles por clase de diámetro y tratamiento para cada edad de medición.	63
Figura 3.1. Distribución de biomasa de la copa según densidad de rodal.....	80
Figura 3.2. Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en los modelos alométricos. ln: logaritmo natural.	82
Figura 4.1. Distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) según tratamiento, sección y altura media en la copa. (—) Índice de área foliar (m ² m ⁻²), (— ■) Área foliar específica (cm ² g ⁻¹).	98
Figura 4.2. Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en el modelo de estimación alométrico de área foliar proyectada por árbol.	101
Figura 4.3: Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en el modelo alométrico que estima el índice de área foliar (IAF).	102
Figura 4.4: Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en el modelo alométrico que estima el área foliar específica (AFE).	103

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1. Antecedentes de <i>E. nitens</i> en Australia y Chile.	10
Tabla 1.2. Altura media de plantas según periodo de medición, calidad de sitio (2) y tipo de preparación de suelo (3) (Laffan <i>et al.</i> , 2003).	18
Tabla 1.3. Esquema de manejo (o esquema de gestión) para la producción de madera aserrada en plantaciones de <i>E. nitens</i> en Tasmania, Australia.	24
Tabla 1.4. Prescripciones de poda y raleos comerciales que aplica Forestal Mininco S.A. en plantaciones de <i>E. nitens</i> para obtener rollizos con madera sin defecto, en sitios de alta productividad ($40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).	26
Tabla 1.5. Propiedades biométricas de la fibra según edad de <i>E. nitens</i>	38
Tabla 1.6. Propiedades químicas según edad de <i>E. nitens</i>	39
Tabla 1.7. Propiedades mecánicas según estado de humedad de <i>E. nitens</i>	39
Tabla 1.8. Rendimiento volumétrico y productividad de la pulpa de <i>E. nitens</i> según clase de edad de los árboles.	40
Tabla 2.1. Efecto de los tratamientos en el tamaño y forma fustal, según edad del rodal (*). ..	58
Tabla 2.2. Tamaño y forma fustal para cada nivel de poda y raleo del rodal (*).	59
Tabla 2.3. Volumen total e incremento volumétrico según tratamiento y edad de rodal (*). ..	62
Tabla 3.1. Efecto de los tratamientos en la cantidad y distribución de biomasa aérea seca (*). ..	77
Tabla 3.2. Cantidad y distribución de biomasa según sección de copa y nivel de intervención de raleo y poda (*).	78
Tabla 3.3. Cantidad y distribución de biomasa de la copa según sección y tratamiento (*). ...	79
Tabla 3.4. Funciones alométricas para los componentes de biomasa aérea (kg) (*) 81	81
Tabla 4.1. Cantidad y distribución del área foliar proyectada (AFP) según sección de copa y tratamiento (*).	94

Índice General

Tabla 4.2. Cantidad y distribución del área foliar proyectada (AFP) según sección de copa y nivel de intervención de raleo y poda (*).	95
Tabla 4.3. Efecto de los tratamientos en la cantidad y distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) (*).	96
Tabla 4.4. Cantidad y distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) según sección de copa y nivel de intervención de raleo y poda (*).	97
Tabla 4.5. Funciones alométricas por sección y total de copa (*).	100

ÍNDICE DE FÓRMULAS

	Página
Fórmula 2.1. Modelo estadístico del diseño experimental.....	55
Fórmula 2.2. Factor de forma Girad.....	56
Fórmula 3.1. Modelo alométrico de Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997).....	75
Fórmula 3.2. Modelo alométrico linealizado de Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997).....	75

INTRODUCCIÓN GENERAL

CAPÍTULO 1

1. CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. MARCO GENERAL

En el mundo se incrementa continuamente la necesidad de madera industrial. La demanda al año 2000 se estimaba entre 1.500 y 1.600 millones de metros cúbicos anuales y al año 2050 habrá crecido entre un 50 y un 75 por ciento (Sedjo, 2001). El 65% del consumo mundial es aportado por bosques naturales (FAO, 2002), disminuyendo con ello la superficie de este tipo de bosques en gran parte del mundo, especialmente en áreas tropicales. Durante el decenio de 1990, la pérdida total de bosques naturales fue de 16,1 millones de hectáreas anuales, de las cuales 15,2 millones de hectáreas crecían en los trópicos (FAO, 2002)

Mientras la superficie de bosques naturales disminuye, la superficie mundial de plantaciones forestales se incrementa a una tasa anual estimada de 3,1 millones de hectáreas (FAO, 2002). En el año 2000, las plantaciones forestales cubrían 187 millones de hectáreas, de las cuales el 62% se encontraban en Asia. Este es un aumento considerable respecto a la estimación de 1995 de 124 millones de hectáreas (FAO, 2002).

Aunque las plantaciones forestales constituyen sólo el 5% de la cubierta forestal mundial, aportan cerca del 35% de la madera en trozo. En el año 2050 esta cifra aumentará al 75% (Sedjo, 2001). En algunos países la producción desde plantaciones forestales ya aporta la mayoría del suministro de madera para uso industrial (es el caso de Chile). En el ámbito mundial, la mitad de las plantaciones forestales están destinadas a fines industriales (FAO, 2002).

Todo señala que los bosques naturales aportarán cada vez menos al suministro de madera, como consecuencia de limitaciones ambientales, de accesibilidad y aumentos de los costes de cosecha y transporte. Mientras el coste de aprovechamiento de los bosques naturales aumenta, el coste de aprovechamiento de las plantaciones forestales disminuye. Esto se debe a la adopción de nuevas técnicas que aumentan el rendimiento y a la implementación de exitosos programas genéticos (Sedjo, 2001).

De las especies forestales que se plantan en el mundo, las especies del género *Eucalyptus* han sido aceptadas por su facilidad de adaptación a un amplio rango de sitios, crecimiento rápido, fácil cultivo con fines industriales y amplio uso en agroforestería (Ciesla *et al.*, 1996). Al año 2000, las plantaciones con especies del género *Eucalyptus* se acercaban a los 18 millones de hectáreas (aproximadamente el 10% del total mundial), constituyéndose en el segundo género más plantado después de *Pinus* (FAO, 2002). India, Brasil y China concentran el 69% del total mundial plantado con *Eucalyptus*.

El uso industrial principal de la madera de *Eucalyptus* es la producción de celulosa. Su utilización como madera sólida se ha visto limitada porque presenta dificultades de secado y aserrío, en especial la susceptibilidad a agrietarse y deformarse; lo que se traduce en menores rendimientos y mayores costes. La mayor densidad de la madera respecto a las coníferas presenta también una desventaja, especialmente en productos donde el peso constituye un atributo poco deseable, pues encarece los fletes y dificulta la manipulación.

Sin embargo, el *Eucalyptus* tiene la capacidad de producir volúmenes aserrables y chapas limpias a un coste de formación menor que productos equivalentes provenientes de coníferas, lo que permite absorber costes asociados a sus dificultades productivas (Raga, 2003). De esta manera, el *Eucalyptus* emerge como un competidor ambientalmente sustentable para las maderas duras extraídas de bosques naturales.

Algunas de sus especies (*e.g.* *E. grandis* y *E. nitens*) presentan vetas atractivas para efectos decorativos, con atributos de uso estructural superiores a varias coníferas (*P. radiata*, *P. taeda* y *P. elliotti*, entre otras), lo que les abren un campo interesante en los productos de ingeniería orientados a dichos usos (Raga, 2003). Varias empresas forestales están desarrollando productos asociados a *Eucalyptus grandis*. Es el caso de la empresa brasileña Aracruz que estableció un acuerdo con la empresa Weyerhaeuser (EEUU) para la comercialización exclusiva de madera de *E. grandis*. También Boise Cascade (EEUU) ha iniciado operaciones en Brasil para producir y enviar chapas a sus plantas en EEUU. En Argentina, la empresa Forestadora Tapebicué desarrolla un programa de comercialización para promover terciados y otros productos de *E. grandis* (Raga, 2003) y en Uruguay, la Compañía Forestal Uruguay produce exitosamente maderas de alta calidad de *E. grandis* (Infor, 2004c).

Otra especie de *Eucalyptus* utilizada ampliamente por la industria forestal es *E. globulus*. Esta especie posee excelentes cualidades para la producción de pulpa por sus características de fibra y alta densidad (Raga, 2003). En Chile presenta baja demanda para aplicaciones de madera sólida, por su dificultad de secado y proceso, su alto peso y las características menos estéticas de su veta, aunque esto está cambiando últimamente.

En España, *E. globulus* es utilizado principalmente para la producción de pulpa. El principal productor es el grupo ENCE que posee fábricas en Asturias, Pontevedra y Huelva. Además, este grupo exporta madera aserrada seca de eucalipto al sudeste asiático (ENCE, 2004). También se elaboran tableros (empresas Finsa y Sonae) y perfiles laminados (Laminados Villapol) (Touza y Sanz, 2002).

Sin embargo, la especie que en la actualidad acapara la atención en Tasmania (Australia) y en Chile es *E. nitens*. La madera sólida de *E. nitens* presenta cualidades intermedias entre *E. globulus* y *E. grandis*. Es más ligero que *E. globulus*, aparentemente menos complicado de procesar y tiene mejor apariencia. Respecto a *E. grandis* es algo más pesado y posiblemente más complicado de procesar, pero su coloración muy clara le da ventajas para recibir teñidos, pinturas y revestimientos (Lignum, 2003). Para la producción de pulpa, *E. nitens* es aún poco conocido, aunque se considera que es una especie con mejores características que *E. grandis* (base de la exitosa industria brasileña) (Raga, 2003). En Tasmania (Australia) se han establecido extensas superficies para la producción de madera para la industria de la pulpa (Pinkard *et al.*, 1995).

En general, la producción de madera de *Eucalyptus* se concentra en pocos países y en pocas especies. El mayor productor es Australia a partir de bosques naturales de *E. regnans*, *E. delegatensis* y *E. obliqua*. La producción desde plantaciones se concentra en *E. grandis* (Brasil, Sudáfrica, Argentina y Uruguay), *E. globulus* (Portugal, España y Chile), *E. nitens* (Australia y Chile) (Infor, 2004c).

En Chile, algunas empresas forestales están produciendo *E. nitens*, entre las cuales se encuentran Forestal y Agrícola Monte Águila, y Tornagaleones. Ya a fines de los años noventa sus bosques comenzaron a ser productivos, iniciándose las primeras exportaciones de

rollizos y astillas a Japón. Adicionalmente, su uso en la industria de la celulosa se incrementará con la demanda por parte de la recién construida fábrica Celulosa Valdivia (ubicada en el sur del país) en alrededor de 700 mil metros cúbicos anuales. También se debe considerar la mayor demanda que se generará a fines del 2006 con la puesta en marcha de la planta de Celulosa Santa Fe (planta 2) y la planta de Celulosa Nueva Aldea (ambas ubicadas en la zona central de Chile). Se estima que la disponibilidad nacional de madera de *E. nitens* alcanzará el año 2010 a 3,7 millones de m³ (Infor, 2004c).

En la industria de tableros, *E. nitens* es utilizado en la fabricación de tableros estructurales OSB (Oriented Strand Boards) por parte de la empresa Louisiana Pacific Chile y tableros MDF (Medium Density Fiberboard) y de partículas por la empresa Masisa (Lignum, 2005).

En Chile, Forestal y Agrícola Monte Águila S.A. es el principal productor de madera de *Eucalyptus*, con más de 1 millón de metros cúbicos por año. De este total, aproximadamente el 40% corresponde a *E. nitens*. La empresa produce madera pulpable, aserrable y madera para chapas. También desarrolla productos para la industria del mueble y la construcción, como pisos y marcos de ventanas (Lignum, 2003).

Estudios del Instituto Forestal de Chile indican que *E. nitens* puede producir madera de tipo aserrable casi en la mitad de tiempo que sus naturales competidores o especies alternativas y adicionalmente, con propiedades madereras superiores (Lignum, 2003). Sin embargo, para que esto ocurra de manera sustentable, se debe alcanzar un adecuado nivel de conocimiento científico y de opciones de manejo silvícola para la especie.

En Chile es escasa la investigación publicada de prácticas silvícolas aplicadas a *E. nitens* (Infor, 2004) y por lo tanto, urge la realización de estudios que permitan dirigir el manejo silvícola de la especie hacia opciones económicamente rentables y medio ambientalmente sostenibles.

1.2. ANTECEDENTES CIENTÍFICOS GENERALES DE LA ESPECIE

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden, de nombre vulgar en Australia “Shining gum”, es una especie de rápido crecimiento originaria del sudeste australiano. Pertenece a la clase *Angiospermae*, subclase *Dicotyledonia* y familia *Myrtaceae*.

El nombre Maiden tiene su origen en el científico J.H. Maiden que hizo un estudio fundamental sobre *Eucalyptus*, al publicar con el título “*A critical revision of the genus Eucalyptus (1904–1931)*” una serie de descripciones, muy bien ilustradas, de todos los taxones de *Eucalyptus*. Un nuevo adelanto en esa materia lo hizo W.F. Blakely, ayudante de Maiden, quien publicó en 1934 “*A key to the Eucalyptus*”, donde se describe 500 especies y 138 variedades (FAO, 1981).

Los árboles de *E. nitens* alcanzan una altura de hasta 60 m, de tronco recto, copa amplia (Figura 1.1). Su corteza es lisa, descortezándose en tiras. Sus hojas juveniles son opuestas, sésiles, ovales a lanceoladas anchas y glaucas. Las hojas adultas son alternas, pecioladas, lanceoladas a falcadas. Puede alcanzar en su distribución natural diámetros de 1,8 m (Nicholls y Pederick, 1979).

Comercialmente la especie ha adquirido importancia durante la última década, debido a que se puede desarrollar en condiciones de clima más fríos que *E. globulus* (Infor, 2004) y al alto crecimiento que alcanza. Hay varios programas de introducción de especies que consideran a *E. nitens*. Es el caso de China (Crc, 2001), Reino Unido (Purse y Richardson, 2001) y Nueva Zelanda (Sims *et al.*, 2001).

De acuerdo al informe publicado por Crc (2001), existe interés por parte de China para establecer plantaciones de *E. nitens*. China en la actualidad es uno de los mayores forestadores del mundo con un total plantado de 45,1 millones de ha (alrededor del 24% de la superficie plantada en el mundo) (FAO, 2002), incrementando anualmente su superficie de *Eucalyptus* en 100.000 ha (Morris *et al.*, 2004). Adicionalmente, el gobierno de China está impulsando un “Programa de plantaciones de rápido crecimiento y alto rendimiento” que incluye el establecimiento de 13,3 millones de ha de diferentes especies para producir entre 140-150 millones de m³ al año 2015 (Jiang y Zhang, 2003). Las provincias ubicadas en el

suroeste de China, han sido seleccionadas como adecuadas para el establecimiento de *E. nitens* (Attiwill y Adams, 1996).



Figura 1.1. Rodales de *E. nitens* creciendo en Chile. Las fotos de la izquierda corresponden al Proyecto Ñadis que desarrolla el Instituto Forestal (Región de los Lagos). El rodal de la derecha corresponde a un ensayo de poda y raleo establecido en Los Álamos (Región del Bío Bío).

La plantación mundial de *E. nitens* se ha incrementado en los últimos años. En el año 1997 la superficie era de 220.000 ha (Tibbits *et al.*, 1997) y al año 2004 de 340.000 ha (Infor, 2004), distribuidas en Australia (Tasmania y Victoria), Chile, Sudáfrica, Nueva Zelanda y España. La mayoría (88%) se encuentran en Australia y Chile (Infor, 2004). En Australia hay 160.000 ha de *E. nitens* (110.000 ha en la isla de Tasmania) y en Chile un total de 140.000 ha en la zona centro sur del país (desde Concepción a Osorno) (Infor, 2004). Ha sido notable el incremento de la superficie de *E. nitens* en Chile, considerando que al año 1995 la superficie era de 46.429 ha según el “Catastro de plantaciones forestales de Eucaliptos” de Infor-Corfo (Infor, 2004b).

En España, recientes evaluaciones indican que la superficie alcanza a 20.000 ha aproximadamente¹. Según Lorenzo y Álvarez (1999), las plantaciones se encuentran en la provincia de Lugo, fundamentalmente en las comarcas de Becerreá, Cospeito, Riotorto, Xermade, Villalba y especialmente Pastoriza. Son plantaciones de superficie variable, en la mayoría de los casos menores de 2 ha (Castillón *et al.*, 1998), las cuales se han establecido en los últimos 20 años (Álvarez *et al.*, 2002).

Sudáfrica, en el año 1997, tenía 30.000 ha de *E. nitens*, establecidas en suelos ubicados a 1.300 m.s.n.m. con pluviometría de 850 mm. La mayoría de las plantaciones son utilizadas para la fabricación de pulpa (Clarke, 1999). Sólo un 7% de la superficie está destinada a la producción de trozas aserrables (Infor, 2004).

En Nueva Zelanda, *E. nitens* es la principal especie de *Eucalyptus* que se planta en suelos de la zona central de la isla Norte y Sur para la producción de fibra para pulpa y chip. La superficie estimada al año 1995 alcanzaba a 4.000 ha (Macalister 1995 citado por Candy 1997).

1.2.1. DISTRIBUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS

La distribución natural de la especie se encuentra en Australia, en los estados de New South Wales (NSW) y Victoria, entre los 30° a 38° de latitud sur y rango altitudinal entre 600 y 1.500 m.s.n.m. La especie cubre cuatro regiones principales, dos en NSW: una al norte y otra al sur de NSW; y dos en Victoria: una al este de las “gippsland” y la otra en el centro de la “highlands” o tierras altas (Dutkowski *et al.*, 2001) (Figura 1.2). En esta última, se ubican las procedencias más conocidas: Rubicon, Toorong y Macalister (Ipinza *et al.*, 1998).

¹ R. Rodríguez S., Universidad Santiago de Compostela, España. Comunicación personal (2005).

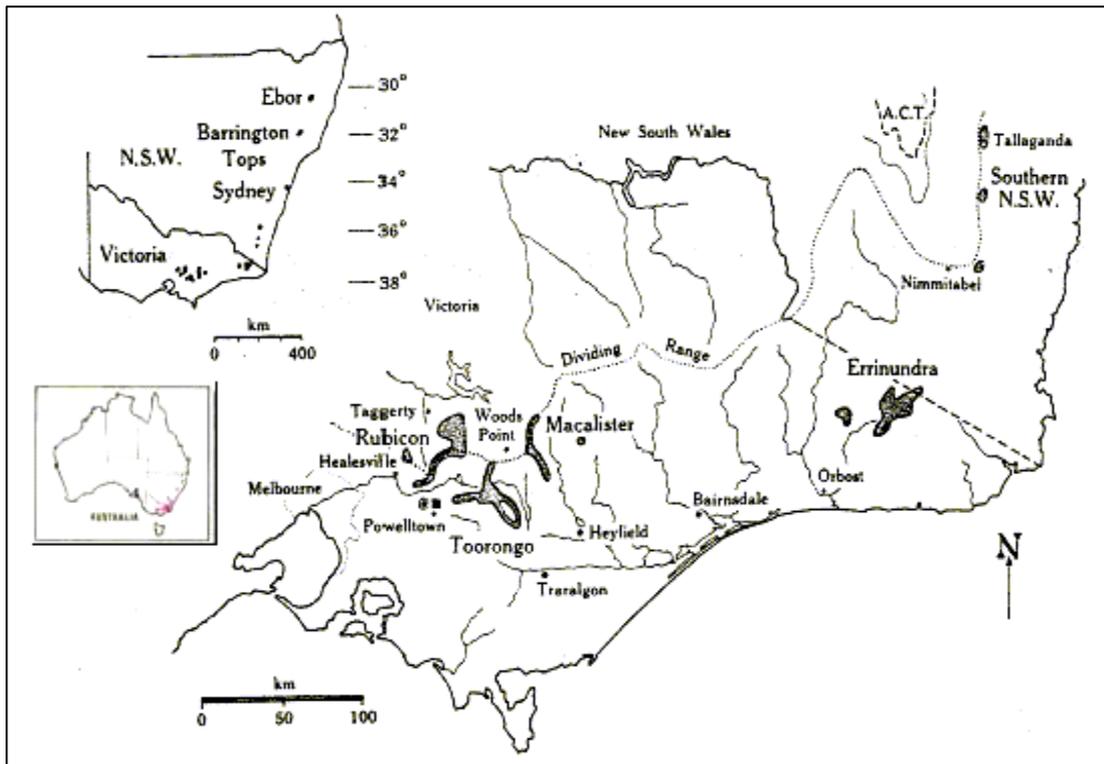


Figura 1.2. Distribución natural de *E. nitens* en el sudeste de Australia. Se indican las procedencias más conocidas (Dutkowski *et al.*, 2001).

Las condiciones ambientales en su distribución natural corresponden a precipitaciones invernales entre 750 y 1.250 mm, temperaturas medias máxima del mes más cálido entre 21 y 24°C, media mínima del mes más frío entre -2 a 2°C, con 50 a 150 heladas anuales. Soporta nieve ocasionalmente (FAO, 1981). La especie ha sido establecida en sitios bajos de las “highlands”, de buena calidad y altas precipitaciones (Ellis, 1992). Estos sitios presentan temperaturas medias anuales bajas, con presencia de heladas (Davidson *et al.*, 1995).

En Chile, las plantaciones de *E. nitens* se ubican en la zona centro sur del país (Figura 1.3), en sitios de buena calidad. La Tabla 1.1 resume antecedentes de la especie en Australia y Chile.

Tabla 1.1. Antecedentes de *E. nitens* en Australia y Chile.

Característica	Australia	Chile
Localización	Entre los 30 y 38° latitud sur, en Victoria y New South Wales	Entre los 32 y 43° latitud sur, regiones del Bío Bío y de Los Lagos.
Altitud	Entre los 600 y 1.500 m.s.n.m	En la costa desde 180 m.s.n.m. En la precordillera andina hasta los 1.300 m.s.n.m. (sector de Curacautín).
Temperatura	Mes más caluroso: 21 a 23°C. Mes más frío: -5 a 2°C	Resiste hasta un mínimo de -12°C
Precipitación	Entre 750 y 1.750 mm anuales	Desde 800 mm anuales, con precipitaciones de verano no inferior a 40 mm por mes. No resiste sequía.
Suelos	Se desarrolla en un amplio rango de suelos, obteniéndose los mejores resultados en suelos franco arcilloso, de profundidad media, fertilidad moderada y bien drenados. No soporta suelos calcáreos.	Crece bien en suelos costeros de buena calidad y en suelos profundos de trumao de la precordillera andina. La especie no debe establecerse en suelos de baja fertilidad y escaso drenaje.

Fuente: Boland *et al.* (1980) e Infor (1986), citados por Infor (2004)

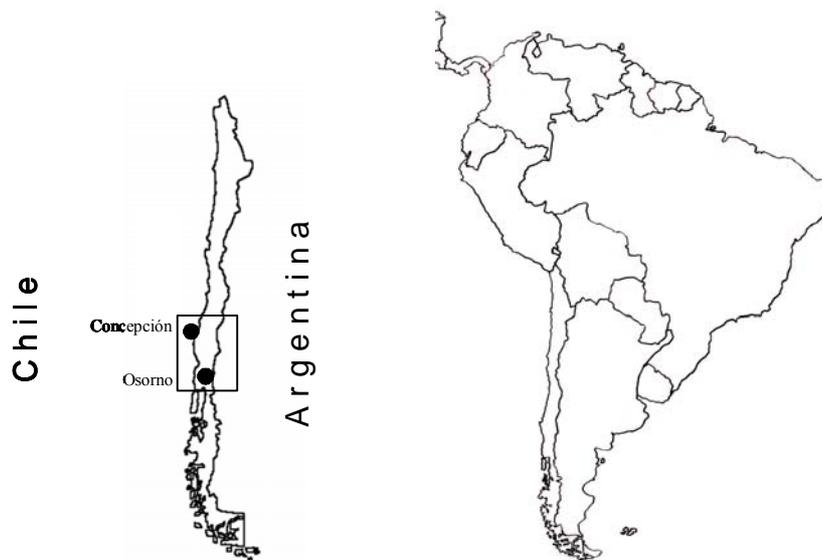


Figura 1.3. Distribución de las plantaciones de *E. nitens* en Chile.

En España, las plantaciones de *E. nitens* se realizan a altitud generalmente superior a 500 m.s.n.m., llegando a un máximo de 900 – 1.000 m.s.n.m. Se ha podido observar que esta especie está siendo bastante empleada en repoblación forestal en zonas demasiado frías como para repoblar con *E. globulus* (Castillón *et al.*, 1998). Las procedencias empleadas son: Nsw1 (Nueva Gales del Sur), Vic1 (norte de Victoria) y Vic2 (noroeste de Victoria), todas ellas de Australia (Castillón *et al.*, 1998).

1.2.2. PRODUCCIÓN DE PLANTAS Y ESTABLECIMIENTO

E. nitens es una especie que naturalmente se propaga a través de semilla. Este mismo sistema se utiliza en forma operacional para la producción de plantas en los diferentes viveros, utilizando contenedores y técnicas de viverización que permite obtener plantas de características adecuadas para su establecimiento. Existen también otras alternativas de propagación, de carácter vegetativa, como son las técnicas de macropropagación. Esto incluye injertación y enraizamiento de estacas.

Las semillas utilizadas en los viveros de Chile es el resultado de 37 años de ensayos que partió con la introducción de *E. nitens*, en el año 1967, en una pocas parcelas experimentales del Instituto Forestal (Infor, 2004). Se obtuvieron buenos resultados, de allí, que a mediados

de la década del 80 el Instituto Forestal introdujo nuevas procedencias que fueron representadas en diferentes localizaciones a lo largo del país. Los resultados obtenidos indican que las semillas de procedencia de Victoria Central, Australia, son las más adecuadas para el cultivo de *E. nitens* en Chile. Estas procedencias de semillas son Toorongu, Rubican y Macalister (Infor, 2004).

Las especies de *Eucalyptus* producen abundante cantidad de semillas todos los años. En Australia la floración de *E. nitens* se manifiesta a partir de los 4 años (Tibbits, 1991). Lo mismo se ha observado en la Región del Bío Bío (Chile) (Rojas *et al.*, 1993). Por el contrario, la floración en Sudáfrica rara vez ocurre antes de los 10 años (Van Wyk, 1981). En general, la iniciación floral en *E. nitens* ocurre en primavera, aunque los mecanismos que controlan la floración no han sido determinados (Moncur y Hasan, 1994).

El tamaño de las semillas es muy reducido, fluctúa entre 1 a 2 millones de semillas por kilo (Infor, 2004), en condiciones naturales (en Australia) varía entre 1,4 y 3,8 millones de semillas por kilo (Boland *et al.*, 1980). La mayoría de las semillas de *Eucalyptus* germinan bien sin tratamiento pregerminativo (Barros, 1991). Sin embargo, el remojo en agua por 24 a 48 horas permite acelerar, homogeneizar y asegurar su germinación (Infor, 2004), aunque esto puede cambiar según sea la procedencia de la semilla (Humara *et al.*, 2000).

En Chile, la producción de plantas de *E. nitens* se realiza mayoritariamente a raíz cubierta en contenedores de baja capacidad volumétrica, principalmente en los viveros de empresas forestales (Figura 1.4). Estos viveros utilizan bandejas plásticas o de poliestireno expandido, con cavidades que varían entre 45 y 75 cm³ y tubetes, que son unidades independientes, de tamaños entre 68 y 120 cm³. El sustrato utilizado es corteza de pino molida con fertilizante incorporado. En Chile central se sugiere sembrar durante la segunda quincena de noviembre (primavera), cuando la temperatura alcanza los niveles adecuados para una buena germinación (aproximadamente 20°C) (Barros, 1991), evitando con ello que el déficit de agua afecte el crecimiento juvenil (Gutiérrez *et al.*, 2002). *E. nitens* es una especie que responde bien a los diferentes tratamientos en vivero, asegurando así, la sobrevivencia y crecimiento en terreno.



Figura 1.4. Producción de plantas en Chile en la modalidad contenedor (García *et al.*, 2000).

ASPECTOS BIOLÓGICOS DE LAS PLANTACIONES

Luz: La interceptación de la luz es la clave que determina el crecimiento de los árboles (Beadle *et al.*, 1995). La cantidad de radiación interceptada por el bosque está determinada por la extensión del follaje por unidad de suelo y se expresa como índice de área foliar (IAF) (Smethurst *et al.*, 2003). La relación entre el IAF de una plantación y las características del sitio es importante en la determinación del potencial de crecimiento de la plantación, especialmente cuando el IAF es un valor de entrada en los modelos de crecimiento de árboles basados en procesos (Cherry *et al.*, 1998). Los modelos de crecimiento basados en procesos, se fundamentan en la parametrización del ambiente físico, de los procesos fisiológicos y en la interdependencia de los ciclos de agua, carbono y nutrientes que regulan el crecimiento de las distintas especies forestales (Rodríguez y Real, 2004). El IAF para *Eucalyptus* establecido en buenos sitios ($30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) es entre 4,5 y $6,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Beadle *et al.*, 1995), en cambio en sitios pobres es menor a $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Cherry *et al.*, 1998). Al aplicar fertilizante, el IAF varía entre $1,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (baja fertilización) y $9,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (alta fertilización) (Smethurst *et al.*, 2003).

La intervención de poda, especialmente cuando se cortan ramas verdes, afecta el área foliar. La poda practicada en un rodal de 3 años de edad y densidad de $1.430 \text{ arb ha}^{-1}$, redujo el IAF desde $6,3$ a $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ al podar el 50% de la copa viva, aunque aumenta a $5,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ luego de 13 meses de practicada la poda (Pinkard *et al.*, 1999). Al podar 70% de la copa viva, el IAF se

redujo de 6,6 a 1,9 m² m⁻². La disminución del follaje significa entre 20% y 77% de disminución de producción de biomasa neta al podar el 50% y 70% de la copa viva, respectivamente (Pinkard *et al.*, 1999).

Otro indicador de la interceptación de la luz es el área foliar específica (AFE). Este indicador relaciona la extensión del follaje por unidad de peso. El AFE en *E. nitens* no cambia de manera importante al variar la edad y densidad de rodal. En plantas de pocas semanas, el AFE varía aproximadamente entre 4 y 5 m² kg⁻¹ (Close y Beadle, 2004) y a los 7 años, es de 4,75 y 4,93 m² kg⁻¹ para densidad de 500 y 1.667 arb ha⁻¹, respectivamente (Pinkard y Neilsen, 2003).

La luz que intercepta el follaje de la planta está relacionada, de manera importante, con su capacidad de fotosíntesis. *E. nitens* logra mayor fotosíntesis neta por unidad de luz interceptada que *E. globulus* (Battaglia *et al.*, 1996). Esto significa que *E. nitens* es más eficiente en el uso de la luz.

La capacidad de fotosíntesis puede ser modificada por las intervenciones de raleo y poda. El raleo aumenta la capacidad fotosintética de la copa, principalmente en su parte baja, debido a la mejora en las condiciones de luz (Medhurst y Beadle, 2000), en cambio la poda, al eliminar ramas verdes, la reduce. Sin embargo, *E. nitens*, al igual como muchas otras especies, compensan la pérdida de follaje cambiando su patrón de localización de los recursos en favor del desarrollo de área foliar. La magnitud y duración de los cambios se incrementa con la severidad de poda (Pinkard y Beadle, 1998c).

La mayoría de los modelos de crecimiento de procesos consideran como indicador de la interceptación de luz el área foliar horizontal de la vegetación. Esto es una aproximación adecuada cuando hay cierre total de copas, pero no lo es, cuando hay discontinuidad de copas, como es el caso de rodales raleados (Medhurst y Beadle, 2001). Cuando los rodales han sido sometidos a raleos, se debería considerar además, la distribución vertical del IAF y su evolución hasta el cierre de copas.

Bajas temperaturas: Las bajas temperaturas disminuyen la actividad biosintética de las plantas y el normal funcionamiento de los procesos fisiológicos (Alberdi y Corcuera, 1991). Las plantas tolerantes al frío, como es el caso de *E. nitens*, poseen la capacidad de reducir o suprimir la formación de hielo en la pared celular y en los espacios intercelulares. Para esto se requiere la presencia de estructuras denominadas puntos de nucleación de hielo, sobre las cuales el hielo se forma y crece (Azcón-Bieto y Talón, 1993). También las membranas de las células se adaptan a las condiciones de frío variando la proporción entre ácidos grasos saturados e insaturados y la cantidad de esteroides, lo cual permite que puedan seguir funcionando (Salisbury y Ross, 1994).

Un importante proceso fisiológico relacionado con bajas temperaturas y que afecta el crecimiento y nutrición de las plantas es la fotoinhibición. Este proceso es el resultante de baja temperatura seguida de la exposición de las hojas a alta irradiación (Close y Beadle, 2003). Los efectos de la fotoinhibición por enfriamiento en plantas de *E. nitens* fue estudiado por Close y Beadle (2003) en un ensayo establecido en Tasmania. El sitio presentó durante las primeras 12 semanas del ensayo, temperatura media mínima entre -5,5 y 0,5°C y media máxima entre 5,1 y 10,6°C, con 2,7 eventos de heladas por semana. En los días claros, después de heladas, la irradiación fluctuó entre 900 y 1.100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Se determinó que durante las primeras semanas, las plantas estuvieron expuestas al proceso de fotoinhibición con claros efectos negativos sobre el crecimiento de la altura.

A nivel celular, las bajas temperaturas producen cambios en la concentración foliar de N (Close y Beadle, 2003) y en la concentración foliar de antocianina (Close *et al.*, 2004). La concentración del pigmento antocianina es indicador potencial de la resistencia de las plantas de *E. nitens* a bajas temperaturas. En plantas fertilizadas y no fertilizadas de *E. nitens*, el ácido nucleico y N soluble permanecen relativamente constantes durante el periodo de heladas (Close y Beadle, 2003).

Otro de los efectos de las bajas temperatura es la disminución de la fotosíntesis. La tasa máxima de fotosíntesis de *E. nitens* disminuyó entre 10-15% al día siguiente de una helada nocturna de -4,6 a -7,4°C. Al repetirse la helada nocturna, la fotosíntesis vuelve a disminuir en 5-10% (Davidson *et al.*, 1995). La especie recupera su nivel de fotosíntesis sólo con una noche libre de heladas, demostrando con ello, su gran plasticidad ante las bajas temperaturas.

Este aspecto es altamente valorado por los forestadores para la generación de híbridos resistentes a bajas temperaturas (Scott *et al.*, 2002).

Agua: *E. nitens* es una especie que demanda altos niveles de agua. En rodales mixtos de *E. nitens* y *A. dealbata* la transpiración fue de 0,85 mm día⁻¹ a los 4 años de edad y varió entre 1,4 y 2,8 mm día⁻¹ a los 8 años de edad (Hunt y Beadle, 1998). Estos valores son comparables a los obtenidos para bosques nativos de *Eucalyptus* (0,81-1,86 mm día⁻¹, Dunn y Connor 1993; 2,9 mm día⁻¹, Vertessy *et al.*, 1995) y bosques de coníferas (0,67 mm día⁻¹, Èermák *et al.*, 1995); o plantación de pino (1-5 mm día⁻¹, Whitehead y Kelliher 1991), pero menos que una plantación de *Eucalyptus* con dosel cerrado (5-6 mm día⁻¹, Honeysett *et al.*, 1992). Todos los autores citados por Hunt y Beadle (1998).

Aunque no corresponde a *E. nitens*, es interesante el trabajo realizado por Morris *et al.* (2004) en el sureste de China. Estudiaron el uso del agua por parte de plantaciones de *E. urophylla* de 3-4 años de edad, establecidas en suelos de arena con baja retención de agua. El uso anual de agua fue de 542 y 559 mm para las dos localizaciones ensayadas (Hetou y Jijia, respectivamente).

Las intervenciones silvícolas, especialmente raleo, modifican la demanda de agua por parte de la especie. La tasa de uso de agua en los árboles residuales de un raleo se incrementa debido a las modificaciones de la copa de los árboles. Los cambios en el uso diario de agua se explican en gran parte por la diferencia radial y axial de la velocidad de savia (Hunt y Beadle, 1998), la cual varía según la densidad residual del rodal (Medhurst *et al.*, 2002). Por lo tanto, es importante conocer adecuadamente los cambios de la estructura de copa, particularmente la tasa de recuperación del área foliar después de raleo, para la predicción del uso de agua por parte del rodal (Medhurst *et al.*, 2002), lo cual incide en la producción de madera. Stape *et al.* (2004) determinaron en una plantación clonal de *E. grandis x urophylla*, que la producción de madera varió entre 1,8 a 3,8 kg de madera por m⁻³ de agua transpirada, para diferentes niveles de disponibilidad de agua.

El agua es absorbida en su mayor parte a través de las raíces de las plantas. Al respecto, *E. nitens* tiene mayor densidad de raíces largas, biomasa radicular y frecuencia radicular que *E.*

globulus. Esto significa que *E. nitens* posee un sistema radicular más grande y profundo que *E. globulus* (Moroni *et al.*, 2003), aunque esto no hace a *E. nitens* más tolerante a la sequía.

La tolerancia a la sequía entre *E. globulus* y *E. nitens* fue estudiada en Tasmania por White *et al.* (1996) en una plantación con 515 mm de pluviometría anual. Se determinó que el estrés por agua reduce el potencial osmótico en *E. nitens*. También declina lentamente el IAF (Battaglia *et al.*, 1998). Los resultados indican que *E. nitens* es más sensible a la sequía que *E. globulus* y por lo tanto, menos conveniente para el establecimiento en sitios que presenten sequía moderada. Los rasgos que le confieren tolerancia al frío a *E. nitens* son útiles para evitar la desecación más que tolerancia a la sequía (White *et al.*, 1996).

ESQUEMAS DE ESTABLECIMIENTO

El esquema de establecimiento es una secuencia ordenada de actividades que se inicia con labores antes de la plantación, tales como selección de sitio, limpia, preparación de suelo y controles de malezas. La selección de sitio para el establecimiento de *E. nitens* debe considerar suelos de profundidades medias a profundos, de fertilidad moderada a fértiles y drenaje intermedio a bien drenados (García *et al.*, 2000).

La quema de residuos es una de las actividades que se realizan antes de la plantación. Inicialmente, las plantas de *E. nitens* establecidas en suelos con residuos quemados presentan mayor crecimiento en altura y diámetro que plantas establecidas en sectores sin quema, aunque esta diferencia no es significativa luego de 7 meses (Ulloa, 2003). Esto se debe a que la quema de residuos causa una rápida mineralización u oxidación y liberación de nutrientes no volátiles, que se acumulan inicialmente en la superficie del suelo mineral (Francke, 1991).

Otra de las actividades es la preparación del suelo (Figura 1.5). En España, se evaluaron durante 5 años varios métodos de preparación de suelo en plantaciones de *Quercus rotundifolia* y *Pinus halepensis*, determinándose que los mejores resultados se obtuvieron con subsolado y casillas (Bocio *et al.*, 2004). En Tasmania se evaluó el tratamiento de casilla y subsolado con camellón en plantaciones de *E. nitens* ubicados en sitios de diferente calidad. Luego de 2 años de establecido el ensayo, la altura de las plantas es significativamente mayor en los sitios de baja calidad preparados con subsolado y camellón, y en los sitios de buena

calidad preparados con casilla. A los 7 años la altura de las plantas es significativamente mayor sólo en los sitios de buena calidad y cultivados en casilla (Tabla 1.2) (Laffan *et al.*, 2003).



Figura 1.5. Actividades de establecimiento de plantaciones de *E. nitens*. La superficie de la figura posee control de malezas y subsolado superficial (Pérez y Montesinos, 1992).

Tabla 1.2. Altura media de plantas según periodo de medición, calidad de sitio (2) y tipo de preparación de suelo (3) (Laffan *et al.*, 2003).

Sitio	Altura media (m)											
	1996		1997		1998		1999		2000		2002	
	R/M	R-T	R/M	R-T	R/M	R-T	R/M	R-T	R/M	R-T	R/M	R-T
Blessington	0.38	0.34	1.36**	1.12**	2.79**	2.34**	4.49	4.03	5.58	5.36	7.81	7.61
Camden	0.43	0.45	1.31**	1.62**	3.02*	3.53*	5.79	6.31	8.19	8.70	12.42*	13.41*
Glengarry	1.18	1.18	2.28**	1.90**	3.46	3.15	4.30	4.20	4.86	4.83	6.56	5.89
Retreat ¹	0.50**	0.40**	0.96	0.97	1.46	1.55	2.22	2.23	2.99	3.07	5.04	5.59
Plenty	0.44	0.41	1.02*	0.92*	1.61	1.54	2.87	2.82	4.13	4.15	7.10	7.10

* Diferencias entre tratamientos son significativas al nivel del 5% y ** al nivel del 1%.

(1) Sólo subsolado (Retreat), (2) Suelos de baja calidad: Blessington, Glengarry y Retreat. Suelos de alta calidad: Camden y Plenty, (3) R/M: Subsolado y camellón, R-T: Casilla (Ro-Tree cultivator).

Un aspecto importante en los costes de administración y manejo de las plantaciones comerciales es la distribución geométrica de la plantación. Se puede utilizar espaciamiento cuadrado o rectangular debido a que no afecta el tamaño de la rama como tampoco el crecimiento de los árboles (Gerrand y Neilsen, 2000; Neilsen y Pinkard, 2000). Debido a las mayores ventajas operacionales, es recomendable realizar la plantación de *E. nitens* con espaciamiento rectangular, facilitando de esa manera el desplazamiento de equipos y personal al interior de la plantación (Figura 1.6).



Figura 1.6. Plantación de *E. nitens* con espaciamiento rectangular creciendo en la precordillera andina de la Región del Bío Bío (Chile) (Lignum, 2003).

El espaciamiento inicial de la plantación define en gran medida las intervenciones posteriores y el éxito económico de la plantación. Según Jobet (1999), el espaciamiento óptimo desde el punto de vista económico está entre 2,8 y 3,3 m, con densidades entre 870 y 1.200 arb ha⁻¹. En Tasmania, Gerrand *et al.* (1997) sugieren utilizar espaciamiento de 4 x 2,5 m (densidad de 1.000 arb ha⁻¹).

La fertilización es parte importante de los esquemas de establecimiento de *E. nitens*. La aplicación de fertilizantes en suelos con limitaciones nutritivas puede cambiar la distribución relativa de la biomasa de los árboles (Misra *et al.*, 1998) e incrementar la productividad de las plantaciones (Smethurst *et al.*, 2004).

El N y P son dos de los nutrientes que limitan la productividad de las plantaciones de *E. Nitens*. Estos nutrientes se concentran principalmente en hojas y raíces más que en otros componentes de la planta (Misra *et al.*, 1998b). Fertilizar con N y con P los suelos de buena

calidad permite incrementar significativamente el crecimiento de *E. nitens*. Los mejores resultados de aplicación de P se logran fertilizando la plantación a edades tempranas (Bennett *et al.*, 1989), estimulando la concentración del P en el sistema radicular más que en otras partes de la planta (Misra *et al.*, 1998b).

Un esquema de establecimiento de *E. nitens* aplicado en suelos de la precordillera andina de la Región del Bío Bío (Chile) es descrito por Álvarez y Sandoval (1999). El esquema se denomina Operacional y se inicia con control de malezas preplantación, luego plantación de plantas producidas en contenedores de 135 cc. La plantación se realiza manualmente con pala plantadora en casillas de 27 x 27 x 27 cm. Con posterioridad a la plantación se realiza la fertilización. En este esquema no se incluyen trabajos de preparación de suelo (como subsolado) (Figura 1.5), porque es necesario evaluar su aplicación sitio a sitio.

1.2.3. MANEJO Y RENDIMIENTO DE PLANTACIONES

En el contexto mundial, la madera aserrada de *E. nitens* es una excelente opción forestal para producir madera sólida de alto valor comercial, como chapas decorativas, tableros contrachapados, molduras, piezas para muebles y madera estructural, además de la opción pulpable (Pyme, 2003). Las desventajas radican básicamente en las rajaduras de la madera, lo que puede solucionarse a través de silvicultura, métodos adecuados de cosecha y programas de secado (Lignum, 2003).

En la actualidad, *E. nitens* es la especie de más rápido crecimiento que se planta en Chile, con rotaciones pulpable de entre nueve y doce años. Otras especies que se plantan en Chile, como *Pinus radiata*, crece a razón de 20 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y *E. globulus* lo hace a 25 m³ ha⁻¹ año⁻¹, mientras que *E. nitens* puede llegar en promedio a 35 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Lignum, 2003). Similar situación ocurre en Tasmania, donde el volumen de *E. nitens* fue 4,8 veces el volumen de *P. radiata*, medido a los 7 años de edad (Laffan *et al.*, 2003).

MANEJO DE PLANTACIONES

En Australia, en la isla de Tasmania, durante las dos últimas décadas se han realizado trabajos de investigación relacionados con el manejo silvícola de *E. nitens*. La investigación se orienta

a evaluar la factibilidad económica de producir trozas aserrables y chapas, estableciéndose ensayos destinados a determinar espaciamiento iniciales óptimos y a generar esquemas de manejo² silvícola para la especie. Esto ha permitido que Australia concentre el mayor conocimiento de esquemas de manejo para producir trozas de alto valor desde plantaciones de *E. nitens*.

La empresa Forestal Tasmania ha sido pionera en establecer plantaciones de *E. nitens* para la producción de madera aserrada y chapas. Posee esquemas de manejo que considera espaciamiento inicial, control diámetro de ramas, edad de raleos comerciales e intensidades de podas (Neilsen y Pinkard, 2000). También la empresa North Forest Products produce madera principalmente de *E. nitens*. En este caso, la especie fue seleccionada por su resistencia al frío y amplio rango de sitios en los cuales crece bien y relativamente libre de pestes, además, su madera es de buena calidad para la industria de la pulpa. Adicionalmente, en el sureste de Australia y siguiendo la tendencia, medianos y pequeños propietarios forestales de plantaciones de *E. nitens*, realizan esfuerzos para incorporar podas que permitan generar madera de mayor calidad (Pinkard *et al.*, 1995).

El efecto de raleos precomerciales o comerciales y podas en especies del género *Eucalyptus* está escasamente documentado en la literatura. Usualmente las plantaciones se han destinado a la producción de pulpa, por lo que su manejo se concentra en el establecimiento. La mayoría de las empresas forestales han establecido plantaciones con rotaciones cortas (entre 7 y 12 años), no requiriendo esquemas de manejo que incluyan podas y raleos. En Chile, algunas de estas empresas han establecido ensayos y aplicado poda y raleos en superficies limitadas de su patrimonio forestal, sus resultados son utilizados en forma reservada, no estando disponible para medianos y pequeños propietarios (Infor, 2004).

INTERVENCIONES DE RALEO

El raleo afecta algunas características de la estructura de la copa de *E. nitens*. Entre las características que se modifican se encuentra el tamaño de las ramas. Las ramas son más grandes en la base de la copa (Medhurst y Beadle, 2001), aumentando a medida que

² El concepto Esquema de Manejo, se refiere a la secuencia ordenada de tratamientos silvícolas, determinada en base a criterios silvícolas y económicos, a objeto de obtener del rodal la máxima rentabilidad.

disminuye la densidad residual (Neilsen y Gerrand, 1999). También el raleo afecta el largo de copa verde. Al comparar el largo de copa verde en plantaciones de densidad entre 500 y 1.500 arb ha⁻¹, el largo fue de 2,5 y 5,0 m, para las respectivas densidades (Neilsen y Gerrand, 1999). Las características de la estructura de la copa que no se modifican son el ángulo de la rama y la relación entre tamaño y área foliar de la rama (Medhurst y Beadle, 2001).

El raleo también afecta el crecimiento en diámetro de los árboles. El dap (o diámetro normal) de los árboles residuales de *E. nitens* se incrementa con el espaciamiento y las diferencias tienden a aumentar con la edad (Jobet, 1999; Muñoz y Espinosa, 1999; Medhurst y Beadle, 2000; Muñoz *et al.*, 2005). El raleo también afecta el área basal (Jobet, 1999; Muñoz y Espinosa, 1999).

Finalmente, el raleo no afecta la altura media de los árboles residuales (Jobet, 1999; Neilsen y Gerrand, 1999; Muñoz y Espinosa, 1999).

INTERVENCIONES DE PODA

E. nitens es una especie que no presenta poda natural, lo que genera presencia de nudos en la madera (Kube y Raymond, 2002; Montagu *et al.*, 2003; Infor, 2004). Por consiguiente, la poda de ramas antes de su muerte es considerada esencial para la producción de madera de alta calidad (Gerrand *et al.*, 1997; Pinkard y Beadle, 1998; Muñoz *et al.*, 2005). A su vez, la combinación de regímenes de poda y raleo aplicado al manejo de esta especie, permite controlar la dimensión de los nudos, limitando este defecto a una porción reducida del corazón nudoso del fuste (Neilsen y Pinkard, 2000).

Adicionalmente, la decisión de podar requiere considerar las características del rodal y de sitio, además de aspectos económicos. Por lo tanto, la poda no debe considerarse aislada de las otras operaciones silviculturales (Montagu *et al.*, 2003).

La poda puede incrementar el riesgo de pudrición en árboles de *E. nitens*. El riesgo dependerá de la presencia de ramas vivas o muertas, tamaño de la rama, época de poda, técnicas y herramientas de poda (Montagu *et al.*, 2003), aunque podar en diferentes momentos durante el año no ejerce una influencia significativa en el nivel de ataque (Mohammed *et al.*, 2000). La

alta incidencia y severidad del ataque se asocia con la poda de ramas verdes de tamaño igual o mayor a 30 mm (Pinkard, 2002), lo cual se reduce con estrategias de manejo que consideren la evaluación de la copa antes de su cierre y estableciendo una densidad adecuada que permita el control del tamaño de ramas (Neilsen y Pinkard, 2000). También se puede reducir el ataque aplicando fungicida en la herida de poda.

La severidad o altura de poda se relaciona con la capacidad de respuesta de los árboles a la intervención. Poda del 40% (Celhay *et al.*, 1999) y hasta el 50% de la copa viva (aproximadamente 55% del área foliar) no reducen el crecimiento (Pinkard *et al.*, 1995; Neilsen y Pinkard, 2000), como tampoco tiene impacto en la altura e incremento diamétrico en los dos años siguientes al tratamiento (Pinkard y Beadle, 1998b) y en la forma del fuste, salvo que sea intensa (70% de poda de la copa viva) y en ese caso, la forma cambia sólo transitoriamente (Pinkard y Beadle, 1998b). Esto ocurre porque procesos como la fotosíntesis y el desarrollo foliar, se incrementan en la copa remanente (Neilsen y Pinkard, 2000). Podas poco intensas (20% de la altura copa verde) tienen efecto positivo en el crecimiento en diámetro y altura de los árboles (Celhay *et al.*, 1999). También la poda reduce el diámetro y largo de ramas ubicadas en la parte superior de la copa (Pinkard y Beadle, 1998).

ESQUEMAS DE MANEJO

El esquema de manejo silvícola se confecciona de acuerdo a los objetivos de gestión. Los objetivos con *E. nitens* son de dos tipos. Un objetivo busca producir alta cantidad de biomasa por unidad de superficie para la industria de la pulpa, mientras que el otro objetivo persigue producir trozas con madera de calidad para fines aserrables o para su uso como chapas.

Para la producción de pulpa en la zona de Arauco (Chile), un típico esquema de manejo aplicado por las empresas forestales, considera: densidad inicial de 1.600 arb ha⁻¹ con tratamiento de fertilización, control de malezas pre y post plantación (año 0), luego, al año 1, segunda aplicación de fertilizantes y control de malezas. Se espera la cosecha a los 12 años para obtener un volumen de entre 300 a 350 m³ ha⁻¹. Los esquemas de manejo con objetivo pulpable dan énfasis al establecimiento de la plantación con muy pocas intervenciones posteriores.

En cambio, la producción de madera de calidad considera una menor densidad inicial (1.000-1.300 arb ha⁻¹), con varias intervenciones de poda y raleo, planificadas cuidadosamente para aminorar los efectos sobre el crecimiento y estado sanitario del bosque. Un típico esquema de manejo utilizado en Tasmania para la producción de madera aserrada se describe en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Esquema de manejo (o esquema de gestión) para la producción de madera aserrada en plantaciones de *E. nitens* en Tasmania, Australia.

Edad (años)	Condiciones del rodal	Operaciones
0	Densidad inicial	Plantación de 1000 arb ha ⁻¹ (4 m x 2,5 m)
3 ó 4	300 árboles podables por ha, Dap 8-10 cm, altura dominantes > 7m	Seleccionar y podar mejores 300 arb ha ⁻¹ hasta 2,5 m de altura, raleo selectivamente a desecho.
4 ó 5	Dap árboles podables 10-12 cm, altura dominantes >9,5 m	Levante poda 300 ha ⁻¹ a 4,5 m de altura
5 ó 6	Dap árboles podables 11-13 cm, altura dominantes >12 m	Levante poda a 6,4 m de altura
10 a 12	Volumen a ser raleado 70-100 m ³ ha ⁻¹ , tamaño medio árbol removido 0,2 m ³	Raleo comercial 250 arb ha ⁻¹ (densidad residual). Evitar daño de árboles en cosecha final.
30 a 40	Dap promedio para madera aserrada 50-60 cm	Tala rasa

Fuente: Gerrand *et al.*, 1997.

En Chile, la empresa Forestal y Agrícola Monte Águila S.A. posee plantaciones con el objetivo de producir madera aserrada y pulpa. Hasta el año 2000 la empresa realizaba tres raleos (a los 3, 4 y 5 años de edad) y tres podas, antes de los raleos y a la misma edad. La

primera poda a una altura de 2,5 m, la segunda a 5,5 m, mientras que la tercera se realiza hasta los 8 m de altura. La densidad final al momento de la cosecha era de 450 arb ha⁻¹. En la actualidad esta empresa realiza sólo dos raleos y mantiene las podas (Infor, 2004).

Otra empresa que aplica esquemas de manejo con el objetivo de obtener madera sin defecto y madera con nudo firme es Forestal Mininco S.A (Figura 1.7). En la Tabla 1.4 se observa el esquema de manejo para obtener madera sin defectos para un sitio de productividad 40 m³ ha⁻¹ ha⁻¹. Con este esquema de manejo la empresa espera obtener a la cosecha entre un 30 – 35% de volumen con poda.



Figura 1.7. Intervención de poda alta (izquierda) y raleo comercial (derecha) en plantaciones de *E. nitens* (Forestal Mininco S.A., 2003).

Tabla 1.4. Prescripciones de poda y raleos comerciales que aplica Forestal Mininco S.A. en plantaciones de *E. nitens* para obtener rollizos con madera sin defecto, en sitios de alta productividad ($40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ha}^{-1}$).

Intervención	Altura dominante m	Edad años	Época (2)	Densidad arb ha ⁻¹	Altura de poda m	Volumen a cosechar m ³ ha ⁻¹
Plantación				1200-1400		
Poda 1	6 – 7	2 – 2,5	Nov-Mar	600	2 – 2,5	
Poda 2	9 – 12	3 -3,5	May-Ago	450	4-5	
Poda 3	13 – 15	4-4,5	May-Ago	450	6,5 fija	
Raleo 1 (1)		5-6		600		55-65
Raleo 2 (1)		9-10		400		70-80
Cosecha		15-17		400		400-500

Fuente: Forestal Mininco S.A. (2003). (1) Corresponde a raleo comercial. (2) Nov: Noviembre, Mar: Marzo, May: Mayo, Ago: Agosto.

CRECIMIENTO DE LAS PLANTACIONES

El incremento volumétrico en *E. nitens* ha sido medido por diferentes autores, todos ellos señalan altos incrementos volumétricos para la especie. En la costa de la Región del Bío Bío (Chile) se han medido incrementos entre 51 y $77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en plantaciones de 15 años de edad (Prado y Barros, 1991) y $48,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 14 años (Muñoz *et al.*, 2005) (Figura 1.8). En la Región de Los Lagos (Chile) se ha determinado entre $34,3$ y $45,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 12 años (Barros, 1993). En Tasmania se han medido incrementos de $37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 16 años (Nielsen y Gerrand, 1999), $26,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la edad de 9 años (Medhurst *et al.*, 2001) y $27,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la edad de 7 años (Pinkard y Nielsen, 2003). En España, se ha medido en el Municipio de Pastoriza (Galicia), incrementos de $37,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 8 años de edad (Lorenzo y Álvarez, 1999).

A pesar que en Chile se aplican con éxito, desde la década del 80, modelos de crecimiento para *Pinus radiata*, la construcción de modelos de crecimiento para *E. nitens* es reciente. En la década del 90, el Instituto Forestal de Chile, desarrolló un modelo básico llamado Euca3.2, el cual permitía simular el rendimiento y crecimiento de rodales de *E. nitens* ubicados entre

las regiones del Bío Bío y Los Lagos, dadas ciertas condiciones iniciales de densidad, área basal y sitio (Pinilla *et al.*, 2001). También la Fundación Chile, en conjunto con el Instituto Forestal y empresas forestales desarrollaron un simulador de crecimiento, llamado Eucasim, para *E. globulus* y *E. nitens*. Este simulador considera relaciones funcionales obtenidas de ajustes de datos provenientes de parcelas permanentes distribuidas en las diferentes zonas de crecimiento de Chile, incluye un simulador de trozado y un módulo de evaluación económica.



Figura 1.8. Rodal de *E. nitens* de 14 años ubicado en la zona de Arauco, Chile.

En el modelo Euca3.2, el sitio se representa por la altura dominante de los 100 árboles de mayor dap a la edad clave de 10 años. El sitio está agrupado en seis clases de sitio con valores que fluctúan entre < 16 m (clase de sitio VI) y > 32 m (clase de sitio I) (Infor, 2004).

En Nueva Zelanda se desarrolló para *E. nitens*, un modelo de crecimiento empírico denominado NitGro usando parcelas permanentes ubicadas en Tasmania y Nueva Zelanda (Candy, 1997). El modelo permite determinar el efecto de podas y raleos en el crecimiento de los árboles. Para predecir la productividad se utiliza el índice de sitio como expresión de la altura media dominante a la edad clave de 15 años.

El modelo NitGro ha sido utilizado, en combinación con el modelo basado en procesos ProMod, para predecir la altura, área foliar, largo de copa y volumen en plantaciones de *E. globulus* localizadas en el norte de Tasmania (Battaglia *et al.*, 1999) y también para programar operaciones de poda y raleos (Pinkard y Battaglia, 2001). El modelo de proceso ProMod, que fue desarrollado originalmente para *E. globulus*, ha sido parametrizado para *E. nitens* y *P. radiata* para su uso en la determinación de sitios potenciales de plantación, utilizando datos como latitud, características del suelo y clima (Sands *et al.*, 2000).

El modelo 3-PG es otro de los modelos utilizados en especies de *Eucalyptus*. El modelo 3-PG (Physiological Principles Predicting Growth) desarrollado por Landsberg y Waring (1997), es un modelo de procesos que predice el crecimiento de rodal. Las entradas al modelo son producción primaria neta, estado de la biomasa del follaje, fuste y raíces; número de fustes, agua disponible y transpiración. Sands y Landsberg (2002) utilizaron el modelo para estimar el crecimiento de rodales de *E. globulus* manejados intensivamente en un amplio rango de sitios de Australia. En Sudáfrica se analiza su adopción como herramienta de manejo aplicable a *E. grandis* (Sands, 2003). En Chile ha sido utilizado para predecir la productividad de *E. nitens* en suelos de la Región del Bío Bío (Rodríguez y Real, 2004).

INTERVENCIONES SILVÍCOLAS Y SANIDAD DE LOS ÁRBOLES

Las heridas en el fuste de los árboles proporcionan una ruta para la entrada de hongos de pudrición, por lo tanto, los métodos de poda y raleo deben adaptarse para minimizar el daño a los árboles (Neilsen y Pinkard, 2000). *E. nitens* presenta corteza lisa, delgada, especialmente en edades tempranas de crecimiento, y es por lo tanto, susceptible a daños accidentales durante las faenas de raleo y poda, posibilitando la entrada de hongos de pudrición. En el raleo, los daños pueden ocurrir durante el derribo de los árboles y la extracción de los trozos (Beadle y Medhurst, 1999). En la poda, al golpear y/o presionar las escaleras contra el fuste. Para evitarlo, se debe incorporar a la escalera un protector que disminuya la presión sobre el fuste.

Los árboles son capaces de responder a las heridas generando cambios anatómicos y bioquímicos con el propósito de limitar la extensión de la infección. En *E. nitens* y *E. globulus*, los cambios químicos se relacionan con modificaciones en varios tipos de

polifenoles y los anatómicos, con la formación de un callo, modificación de la orientación celular, reducción del número de vasos e incrementando la densidad del parénquima de la madera (Eyles *et al.*, 2003).

La práctica de poda produce inevitablemente heridas en el fuste, cuya magnitud está relacionada con el tamaño de la rama cortada. La posterior infección se puede limitar sólo al cilindro nudoso del árbol (Barry *et al.*, 2003) (Figura 1.9), siempre que el tamaño de la herida de poda, sea consecuencia de un tamaño de rama menor a 30 mm (Glass y Mackenzie, 1989; Wardlaw y Neilsen, 1999; Pinkard, 2002), aunque Forestal Mininco S.A. (2003) sugiere un tamaño de rama menor o igual a 25 mm en la selección de árboles para poda.



Figura 1.9. A la derecha, mancha de la pudrición en un corte horizontal de la troza (Infor, 2004b). A la izquierda pudrición en la base de la rama podada de *E. nitens* y su expansión al cilindro nudoso (Wiseman *et al.*, 2003).

La pudrición central de color parda (pudrición parda) corresponde entre otros, a residuos de lignina originados por la utilización de los carbohidratos de la madera por parte de hongos (Smith, 1970). Parra (1999) determinó que uno de los hongos causante de la pudrición central en árboles en pie de *E. nitens* era *Coniophora puteana* (*Basidiomycetes*).

1.2.4. CAPACIDAD DE REGENERACIÓN

Los eucaliptos poseen brotes inactivos que permiten la regeneración rápida después de la pérdida de follaje, generalmente producto del fuego. De los cuatro tipos de brotes que pueden ser reconocidos en *Eucalyptus*, la regeneración está relacionada con los brotes epicórmicos (debajo de la corteza) y lignotubérculos (Penfold y Willis 1961, citados por Little y Gardner 2003). El primer brote es originado de un brote axial de la hoja que no se convirtió en rama y que espera ser liberado de la dominación apical. El segundo, se desarrolla a partir de la división de la célula del brote, en la axila del primer par de hojas de la plántula, dando lugar a una hinchazón en la base del tronco. La abundancia de brotes lignotubérculos y epicórmicos afecta la capacidad de regeneración de las especies (Little y Gardner, 2003). *E. nitens* es considerada una especie con baja capacidad de regeneración desde tocón (Florence, 1996).

Algunos eucaliptos (tal como *E. nitens*) carecen de lignotubérculos y deben depender de los brotes epicórmicos para la regeneración. Si se ha extraído la mayor parte del tronco en la cosecha o dañado por la cosecha o incendio, entonces, se ha perdido la mayoría de los brotes epicórmicos. Por lo tanto, la capacidad del árbol de regenerarse depende de los pocos brotes restantes ubicados en la parte basal del tronco y si éstos fallan, por una razón u otra, da por resultado la muerte del tocón. Lo anterior significa, que las buenas técnicas de manejo son vitales para obtener los mejores resultados en esta especie de capacidad de retoñación pobre.

El efecto del origen de la procedencia de las semillas de los árboles es un factor importante en la capacidad de regeneración de las especies (Little y Gardner, 2003). Se conoce que existen diferencias en la capacidad de regeneración entre progenies de *E. camaldulensis* (Grunwald y Karschon, 1974). Lo mismo ocurre con *E. nitens*, la procedencia de Tallaganda superó apreciablemente a la procedencia de Ebor en una evaluación de la capacidad de regeneración de *E. nitens* en Tasmania (Little y Gardner, 2003). En general, las condiciones ecológicas de cada especie y la procedencia de la semilla pueden ser importantes en la capacidad de rebrotar (Muñoz *et al.*, 2003).

Hay dos aspectos principales que afectan el potencial de regeneración: Planificación de la cosecha y características del tocón.

PLANIFICACIÓN DE LA COSECHA

En la planificación de la cosecha se debe considerar la oportunidad de la corta, el diseño de las vías de madereo y las herramientas de corte.

La oportunidad de corta: Se refiere a la estación del año para la ejecución de la corta y al tamaño que deben tener los árboles a cortar, que permita alcanzar el potencial de regeneración de la especie. En cuanto al primer aspecto, la estación del año, el mejor momento para la corta es al comienzo del verano, donde la regeneración será rápida y alcanzará a endurecerse antes del próximo invierno, además, podrá superar de mejor manera la competencia de malezas. En Chile, el 82% de los tocones remanentes (1.450 tocones ha^{-1}) de un rodal de *E. nitens* cosechado a inicios del verano del hemisferio austral generaron rebrotes, con un promedio de 2,6 rebrotes por tocón (Muñoz y Espinosa, 2001) (Figura 1.10) En cambio, cosechas realizadas durante el verano redujeron la capacidad de regeneración, como lo indica Meskimen y Francis (1990) para cosechas de rodales de *Eucalyptus grandis* ubicados en el estado de Florida (EEUU).



Figura 1.10. Regeneración de *E. nitens* a campo abierto (izquierda) y detalle de la distribución de rebrotes (derecha), en tocones remanentes de cosecha en la zona precordillera andina de la Región del Bío Bío.

Con respecto al tamaño apropiado de los árboles, Sims *et al.* (2001) evaluaron nueve especies de *Eucalyptus* bajo un régimen de rotación corta de producción de biomasa, plantadas a una densidad de 5.000 arb ha^{-1} . Al cosecharse la mayoría de las especies obtuvieron una tasa de regeneración sobre el 80%, con excepción de *E. nitens* que resultó menos del 50%. El bajo

porcentaje se explica por la alta densidad de plantación utilizada, que generó individuos de bajo diámetro, y por lo tanto, con un bajo potencial de regeneración. Esto es particularmente crítico en especies de difícil regeneración. Prado *et al.* (1990) y Alarcón (1994) señalan que la retoñación se desarrolla tardíamente, estando determinada probablemente por la edad y época de corta.

Método de volteo y madereo: El método de volteo y madereo de los árboles afecta la capacidad de regeneración (Little y Gardner, 2003). Por lo tanto, la planificación debe considerar este aspecto, estableciendo vías de madereo que minimicen el daño a los tocones por parte de los equipos de madereo. La corteza de *E. nitens* es delgada y no protege adecuadamente a los brotes subyacentes de los daños mecánicos. En Sudáfrica, se determinó que el daño a la corteza de *E. nitens*, durante el volteo y madereo, es el factor más importante que afecta al potencial de regeneración (Little *et al.*, 2002).

Herramientas de corte: Es importante utilizar herramientas de corte que evite el rasgado de la corteza del tocón. El rasgado destruye no solamente brotes inactivos, sino que permite que el agua se acumule en el fondo de la rajadura. Aunque hay un mínimo de peligro de ataque de hongos contra el tocón, esto se puede limitar aún más con el uso de sellantes, como pintura acrílica o pintura antihongos, aplicada sobre el área después de 30 minutos del corte (FAO, 1981).

CARACTERÍSTICAS DEL TOCÓN

Se analizan las características del tocón que tienen relación con la capacidad de regeneración: Diámetro, altura y forma del tocón.

Diámetro: La evaluación realizada en Chile de tocones regenerados después de cosechar un rodal de *E. nitens*, determinó que el 87% de los tocones con rebrotes corresponden a tocones con diámetro entre 11 y 25 cm, siendo la mejor clase de diámetro para producir rebrotes la de 16-20 cm, con 4 o más rebrotes por tocón (Muñoz y Espinosa, 2001). Tendencias similares se han obtenido en Sudáfrica con tocones de *E. grandis*, donde se determinó que tocones de diámetros entre 10 y 20 cm tenían una buena o alta regeneración (FAO, 1981). En Australia, los eucaliptos dañados por fuego, o deformados por otros motivos, de casi todas las especies,

se talaban para regenerar nuevos individuos considerando la recomendación de diámetro límite de tocón no mayor a 20 cm.

Altura: En Chile, se determinó que el 85% de los tocones de *E. nitens* con rebrotes corresponden a tocones con alturas entre 6 y 20 cm, donde la mejor clase de altura para producir rebrotes es la de 11-15 cm (Muñoz y Espinosa, 2001). En la misma tendencia, FAO (1981), recomendaba una altura de tocón entre 10–12 cm.

Forma: El ángulo y exposición del corte del árbol son importantes para la sanidad del tocón y para su capacidad de regeneración (FAO, 1981; Muñoz y Espinosa, 2001). De los tocones que rebrotan, los de forma de bisel representan el 82% del total, de acuerdo a un estudio realizado en un rodal de *E. nitens* en Chile (Muñoz y Espinosa, 2001). Las otras dos formas de tocón ensayadas sólo representan el 18% de los tocones con rebrotes.

1.2.5. DAÑOS BIÓTICOS

ENFERMEDADES CAUSADAS POR HONGOS

Los hongos están entre los principales responsables de las enfermedades del follaje de *E. nitens*. La severidad de la enfermedad dependerá del comportamiento del patógeno y de su interacción con el ambiente y vigor de los árboles (Infor, 2004).

Enfermedades del follaje: Este tipo de enfermedad se puede evidenciar por una gran variedad de síntomas, manchas foliares y lesiones necróticas de distintas formas y coloración sobre el follaje, brotes y tallos. Los hongos *Oidium spp*, *Botryotinia fuckeliana*, *Aulographina eucalypti*, *Phaeoseptoria spp* afectan brotes y hojas de plantas en viveros y plantaciones jóvenes (FAO, 1981; Infor, 2004). El hongo *Mycosphaerella spp* tiene una alta incidencia de ataque en plantaciones, siendo uno de los patógenos foliares más importantes. Se ha detectado en Australia, Nueva Zelanda y Chile (Infor, 2004).

Cancros o chancros en ramas y tallo: Las enfermedades cancrasas se relacionan con la muerte de tejidos en áreas definidas y localizadas en ramas y troncos de los árboles. Entre los agentes causales bióticos se encuentran bacterias, virus y hongos. Los patógenos más

conocidos son *Botryosphaeria spp* y *Endothia gyrosa* (Infor, 2004). Los canchales son más comunes en los árboles bajo estrés por sequía y son caracterizados por la hinchazón del fuste y exudación de cantidades copiosas de quino. En algunos casos, similares síntomas se encuentran en ramas laterales (Ciesla *et al.*, 1996)

DAÑOS CAUSADOS POR INSECTOS

Insectos defoliadores: Su ataque reduce significativamente el área foliar, afectando la capacidad de crecimiento del árbol. Entre los defoliadores más importantes está *Chrysophtharta spp*, *Paropsis spp*, *Antheraea eucalypti* y *Antheraea helena*, que atacan follaje juvenil y brotes de los árboles (Infor, 2004).

Insectos succionadores: Estos insectos se alimentan de la savia de las hojas, tallos nuevos, ramas y ramillas. Un ataque intenso de este tipo de insecto provoca disminución del crecimiento y malformaciones de los árboles. Los insectos *Ctenarytaina eucalypti* y *Eriococcus spp* se han detectado en España, Portugal, Nueva Zelanda (FAO, 1981) y también en Australia, Sudáfrica, Chile (Infor, 2004).

Insectos taladradores: Estos insectos poseen un fuerte aparato bucal masticador que les permite perforar túneles dentro de los tejidos leñosos de las ramas, troncos y raíces, causando problemas en la estructura del árbol y la interrupción del flujo de savia. La especie *Phoracantha semipunctata*, de amplia distribución en el mundo, es uno de los taladradores más conocidos. Otro insecto es *Chilecomadia valdiviana*, originario de los bosques naturales de Chile, que ataca árboles vivos de *E. nitens* formando galería larval, con lo que disminuye la resistencia mecánica del fuste al viento. Además, las galerías posibilitan el ingreso de hongos de mancha y de pudrición (Parra, 1999) (Figura 1.11).



Figura 1.11. Ataque de *Chilecomadia valdiviana* en árboles de *E. nitens* (izquierda) (Forestal Mininco S.A, 2003) y larvas del insecto (derecha) (Infor, 2004).

El ataque de *Chilecomadia valdiviana* no está relacionado con actividades de manejo de poda y raleo, como tampoco con variables dendrométricas del rodal (Troncoso, 2004). Una técnica de disminución del daño, es el establecimiento de árboles cebos al interior de la plantación. Con esto se logra concentrar el ataque de los insectos en pocos individuos, aumentando su reinfestación y disminuyendo con ello, la velocidad de dispersión a individuos sanos (Troncoso, 2004).

DAÑOS CAUSADO POR MAMÍFEROS

En Tasmania (Australia) se ha observado importantes daños causados por mamíferos herbívoros en plantaciones comerciales de *E. nitens*. Los mamíferos son principalmente cuatro: wallabíes (*Macropus rufogriseus* y *Thylogale billardierii*), zarigüeya (*Trichosurus vulpecula*) y conejo (*Oryctolagus cuniculus*). Los daños en la mayoría de los casos afectan a plantaciones menores de un año de edad y consiste en la defoliación por ramoneo. Esto reduce el crecimiento y altera su forma, generando cambios en la distribución espacial de los árboles al interior de las plantaciones.

Bulinski y McArthur (2003) estudiaron el efecto del daño por mamíferos herbívoros en 32 rodales de *E. nitens* en Tasmania. Midieron el daño, abundancia de herbívoros y características de la plantación. Determinaron que el 71% del daño se explica por la cantidad

de herbívoros. El nivel de daño se podría disminuir modificando la palatabilidad de las hojas a través de cambios en las condiciones ambientales de las plantas en vivero (McArthur *et al.*, 2000).

1.2.6. PROPIEDADES Y UTILIZACIÓN DE LA MADERA

PROPIEDADES MACROESTRUCTURALES

Madera: El color de la madera de *E. nitens* varía entre marrón amarillento a marrón rosado y casi blanco en seco (Paz y Pérez, 1999). Un aspecto que diferencia la madera de *E. nitens* de *E. globulus* son los cambios entre madera de primavera y verano, lo cual permite visualizar claramente anillos de crecimiento.

Duramen: El duramen se distribuye a lo largo del árbol en proporciones diferentes. Desde la base y hasta la mitad de la altura del árbol el porcentaje de duramen es de un 50% para luego decrecer hacia la parte alta del árbol donde alcanza un 4% (Lausberg *et al.*, 1995). El duramen de *E. nitens* posee un bajo flujo de movimiento de líquidos hacia dentro o fuera de la madera, afectando la penetración del licor en el pulpaje y el blanqueo en caso de ser necesario (Paz y Pérez, 1999).

Tensiones de crecimiento: Las tensiones que se producen al interior de trozas de *E. nitens*, tiene relación con las fuerzas generadas entre capas sucesivas de madera, debido al crecimiento y la necesidad de mantener la copa en una posición lo más vertical posible. Además, la presencia de tensiones de crecimiento depende de factores genéticos y también de la interacción entre crecimiento y medio ambiente (Paz y Pérez, 1999). Cuando hay mucha tensión, se pueden producir rajaduras al momento del volteo y posteriormente en el almacenamiento, si éste es al sol. El daño puede aumentar al emplear técnicas de volteo inapropiadas (Prado y Barros, 1989).

En *E. nitens* ocurre una situación muy particular con las tensiones internas de la madera. Las rajaduras se producen en madera de primavera, en el sentido radial, especialmente en la zona intermedia entre duramen y albura (Paz y Pérez, 1999), distribuyéndose en un 9,5% en el duramen, 89% en zona intermedia y 1,5% en albura (Lausberg *et al.*, 1995). Las tensiones de

crecimiento también varían con la altura del árbol. En la base a 1,5 m de altura la tensión es de 9,4 MPa y a 15 m la tensión es 5,5 MPa (Prado y Barros, 1989).

Quino: El quino es un exudado fenólico de color oscuro. Constituye una de las fuentes más comunes de degradación y rechazo de manera aserrada y chapas proveniente de los bosques de *Eucalyptus* nativos australianos. Las pequeñas venas de quino disminuyen la calidad visual de madera aserrada y de chapas, mientras que bolsas más grandes afectan la resistencia mecánica de la madera. La cantidad de quino parece depender de la intensidad del daño causado (fuego, mecánico, insectos, otros), espesor de la corteza, vigor del árbol y factores genéticos (Infor, 2004).



Figura 1.12. Bolsa de quino ubicada en la base de una rama de *E. nitens*.

La madera de *E. nitens* está libre de quino, excepto en las áreas nudosas donde se concentra, constituyendo una efectiva barrera contra ataques de hongos (Shield, 1999) (Figura 1.12).

Densidad: En términos tecnológicos, la densidad es la más importante de las características de la madera y un factor crítico en las plantaciones de corta rotación (Wimmer *et al.*, 2002). En *E. nitens*, la mayor variación de la densidad de madera ocurre en sentido radial y la tendencia es aumentar desde la médula hacia la periferia. En altura decrece desde el tocón hasta la altura de pecho (1,3 m), para posteriormente, aumentar a mayor altura (Lausberg *et al.*, 1995). También la densidad aumenta con la edad de los árboles. Para *E. nitens*, en Australia, se ha determinado que a los 10 años la densidad es de 463 kg m⁻³ (Cotterill y Macrae, 1997), a los 24 años de 478 kg m⁻³ y a los 29 años de 554 kg m⁻³ (Yang y Waugh,

1996). En Chile, se ha determinado entre 5 – 7 años de edad densidad de 429 kg m⁻³, entre 8 - 10 años densidad de 433 kg m⁻³ y entre 11 – 13 años densidad de 472 kg m⁻³ (Peredo, 1999).

PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES

Biométricas: Dentro de este grupo se encuentran el peso, longitud y ancho de la fibra. Estas propiedades tienden a aumentar con la edad y con la ubicación en el árbol, en el sentido radial y en altura, aunque es más importante la variación en sentido radial (Paz y Pérez, 1999). Los valores de algunas propiedades biométricas para *E. nitens* se entregan en Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Propiedades biométricas de la fibra según edad de *E. nitens*.

Propiedad	6 años (1)	10 años (2)	15 años (3)	16 años (1)
Peso (mg100m ⁻¹)	4,90	6,40		6,70
Longitud (mm)	0,87	0,97	0,78 – 0,95	0,79
Ancho (mm)		0,20		

Fuente: (1) Paz y Pérez (1999), (2) Cotterill y Macrae (1997), (3) Prado y Barros (1989).

E. nitens tiene fibra más corta que *E. globulus*, lo que permite mayor flexibilidad y mejor adhesión entre ellas.

Químicas: Las propiedades químicas son importantes desde el punto de vista de su uso como materia prima para la fabricación de pulpa. Los valores de las principales propiedades químicas de *E. nitens* se entregan en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Propiedades químicas según edad de *E. nitens*.

Propiedad	6 años	10 años	14 años	16 años
Holocelulosa (%)	73,9	74,7 – 78,0	82,6	83,9
Celulosa (%)	42,6			
α – celulosa (%)			46,8	47,3
Lignina (%)	21,8	23,5 – 24,8	21,7	21,5

Fuente: Paz y Pérez (1999).

Mecánicas: Las propiedades mecánicas de *E. nitens* son similares a las de otros *Eucalyptus*. Varían según la edad, posición en el árbol y el contenido de humedad. Los valores de las principales propiedades mecánicas se entregan en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Propiedades mecánicas según estado de humedad de *E. nitens*.

Propiedad	Madera verde	Madera seca
Módulo de ruptura (kg m^{-3})	55,8 – 73,9	84,6 – 117,8
Módulo de elasticidad (MPa)	8150 – 11200	10260 – 13390
Compresión paralela (MPa)	24,9 – 30,4	56,4
Tracción normal (MPa)	4,2 – 4,7	3,6
Dureza norma (N)	3697 – 4560	3217 – 5766
Clivaje tangencial (N mm^{-1})	62 – 81	59 – 88
Cizalle tangencial (N mm^{-1})	81 – 100	109 - 142

Fuente: Prado y Barros (1989).

UTILIZACIÓN DE LA MADERA

Uso pulpable: El uso mayoritario de madera de *E. nitens* es la fabricación de pulpa (Kube y Raymond, 2002; Smethurst *et al.*, 2003; Infor, 2004). La pulpa de *E. nitens* presenta alta

resistencia a la tensión y a la explosión, alta densidad y baja porosidad de hoja (Paz y Pérez, 1999).

El rendimiento volumétrico, kg de celulosa por m³ de madera, y la productividad de la pulpa (m⁻³ ADT⁻¹) (ADT: tonelada seca al aire), son los parámetros que permiten evaluar la materia prima (Peredo, 1999). Conociendo estos parámetros y la productividad de los bosques, es posible establecer estrategias de abastecimiento de las plantas industriales. Los datos de la Tabla 1.8 señalan que existe una marcada incidencia de la edad de los árboles sobre el rendimiento volumétrico y la productividad de la pulpa. A mayor edad se aprecia mayor rendimiento volumétrico y mayor productividad de la pulpa.

Tabla 1.8. Rendimiento volumétrico y productividad de la pulpa de *E. nitens* según clase de edad de los árboles.

Clase de edad	Rendimiento volumétrico, kg m⁻³	Productividad de pulpa, m⁻³ ADT⁻¹
5 – 7	213	4,69
8 – 10	219	4,56
11 – 13	245	4,08

Fuente: Peredo (1999).

Respecto de la productividad de la pulpa, un análisis comparativo entre *E. nitens* y *E. globulus*, determinó que para producir una tonelada de celulosa seca al aire (ADT), utilizando *E. nitens* de edad entre 11 – 13 años, se necesita aproximadamente 13% más de madera que si se utilizara *E. globulus* (Peredo, 1999). Esto ha influido en su precio, el cual en Chile es aproximadamente un 30% inferior al precio de la madera de *E. globulus*.

Algunos proveedores de madera de *E. nitens*, mezclan su madera con la de *E. globulus*, para así obtener un mayor retorno económico. Esto es rechazado por las empresas que han introducido severos controles en la recepción de madera debido a que afecta la calidad de sus procesos. Conocer claramente la especie o mezcla de especies utilizada en el proceso

industrial, permite genera un producto final más uniforme, con mayor eficiencia del uso de químicos a lo largo del proceso (Quiñónez *et al.*, 2005).

Por lo tanto, la diferenciación entre *E. nitens* y *E. globulus* al momento de ingresar la madera en varias plantas de celulosa de Chile, se ha transformado en un aspecto prioritario. *E. nitens* se puede reconocer en base a una inspección física de la madera, analizando su color, características de los anillos, tipo de rajadura de la cara transversal, análisis de densidad básica y rendimiento pulpable (Quiñónez *et al.*, 2005) (Figura 1.13). También es posible identificar la madera de *E. globulus* y *E. nitens* utilizando técnicas de espectroscopia de infrarrojo cercano (Schimleck *et al.*, 1997; Ruíz *et al.*, 2005).



Figura 1.13. Diferencias visuales que ayudan a reconocer la madera de *E. nitens*. A la izquierda, el rasgado típico en un corte transversal y a derecha, sus anillos de crecimiento claramente definidos (Quiñónez *et al.*, 2005).

Uso aserrable: La madera sólida de *E. nitens* presenta cualidades intermedias, entre *E. globulus* y *E. grandis*. Es más liviana que *E. globulus*, aparentemente menos complicado de procesar y de mejor apariencia, de moderada densidad, puede barnizarse para adquirir semejanza con varias especies tropicales. Las desventajas radican en la rajadura de la madera, lo que puede solucionarse a través de silvicultura, métodos adecuados de cosecha y programas de secado (Lignum, 2003). La madera de *E. nitens* presenta vetas atractivas para efectos decorativos, con atributos de uso estructural superiores a varias coníferas (*radiata*, *taeda*, *elliottii*, entre otras), lo que le abre un campo interesante en los productos de ingeniería orientados a dichos usos (Raga, 2003).

Los defectos típicos de *E. nitens*, son los mismos para todos los *Eucalyptus*, los cuales son (Infor, 2004):

- Grano espiral: Corresponde al crecimiento de las fibras del árbol en forma espiral.
- Tensiones de crecimiento: Son un conjunto de fuerzas de tracción y compresión que se desarrollan en el árbol en pie. También se presenta en la madera recién aserrada, observándose arqueadura cuando es corte tangencial y encorvadura cuando es corte radial. Diversas técnicas han sido probadas para minimizar los efectos de las tensiones. Una de las técnicas se aplica en bosque y consiste en la muerte del árbol antes del volteo por anillamiento o utilizando herbicidas (Figura 1.14). Otras técnicas se aplican en lugares de acopio y consisten en almacenaje en agua o bajo pulverización, calentamiento con vapor o agua caliente, aplicación de incisiones en sus extremos, revestimiento de sus extremos con grasa o cera impermeable, fijación de anillos de metal o plaquetas en sus extremos.
- Nudos: Se eliminan con adecuadas prácticas silvícolas de poda.
- Contracción y colapso: Se eliminan aplicando vapor a la madera aserrada seca o parcialmente seca (reacondicionamiento). También puede disminuirse utilizando madera de árboles seleccionados genéticamente que presenten un bajo nivel de colapso, ya que, el colapso tiene un alto control genético y no está influenciado por la interacción con el sitio (Kube y Raymond, 2002).



Figura 1.14. Anillamiento del árbol antes del volteo (izquierda) y aplicación de biocidas en árboles en pie (Infor, 2004b).

El secado de la madera aserrada de *E. nitens* se caracteriza por la rápida evaporación de agua superficial, produciéndose un alto gradiente de humedad, rápidas contracciones superficiales y tensiones de secado bajo el punto de saturación de la fibra (PSF), generándose con ello, grietas superficiales e internas (Rozas, 2002). Si la madera a secar ha sido seleccionada adecuadamente y se le aplica un presecado en cámara y luego un secado hasta un contenido de humedad del 12%, con procesos parciales de acondicionamiento con vapor, es posible obtener buena calidad de secado, sin presencia significativa de colapso o grietas (Infor, 2004).

Tableros: De acuerdo a lo señalado por Gorrini *et al.* (2004), en dos plantas industriales de la empresa MASISA (Chile) se fabricaron tableros de partículas y MDF (tableros de fibra de densidad media), empleando madera de *E. nitens*. La madera de *E. nitens* reemplazó a un 20% del tradicional *Pinus radiata* en la fabricación de tableros de partículas y en un 100% en MDF. Las propiedades de los tableros de partículas cumplieron con los estándares que se fija MASISA para su producción normal. Sin embargo, los tableros MDF no lograron satisfacer estos estándares. Pese a lo anterior, los valores obtenidos permiten aseverar que, con algunas correcciones al proceso, se podrán producir tableros MDF con *E. nitens*. La edad de la materia prima empleada en el ensayo fue de 5 y 13 años, determinándose que no existen diferencias significativas entre las propiedades físico-mecánicas de los tableros fabricados.

Chapas: El proceso de foliado y debobinado ha sido probado exitosamente en Chile para la obtención de chapas. Navarrete y Vergara (1999) estudiaron el comportamiento de la madera de *E. nitens* en el foliado, obteniendo una chapa radial de 0,6 mm de espesor, valor superior al

que se obtiene con globulus (0,5 mm). El rendimiento promedio fue de 240 m² de chapa por m³ de madera, esto es 39% menos que el rendimiento con *E. globulus*. Los defectos más importantes de las chapas son los nudos y el cambio de color de la madera.

En cuanto al debobinado, Infor (2004b) menciona un ensayo de rendimiento realizado con trozas podadas de 21 años. Las trozas podadas entregaron en promedio 60% de láminas aptas para caras de tablero, con un espesor de lámina de 2,5 mm (Figura 1.15). El estudio determinó que desde trozas de 40 cm de diámetro Jas (norma japonesa), se logra aproximadamente un rendimiento del 50% de chapas. Concluye que es posible obtener chapas de buena calidad si las trozas son sumergidas previamente en agua caliente (60° a 65°C), durante un tiempo suficiente para que la sección interna de la madera alcance esa temperatura.



Figura 1.15. Chapa obtenida de árboles de *E. nitens* podado de 21 años de edad (Infor, 2004b).

Los antecedentes recopilados en esta tesis, cubren diversos aspectos del manejo y procesamiento de la madera de *E. nitens*. Sin embargo y a pesar de los esfuerzos de diferentes centros de investigación de Chile, las investigaciones publicadas no cubren adecuadamente el manejo silvícola de *E. nitens*. La mayor parte de las publicaciones relacionadas con el manejo silvícola provienen de Australia (Tasmania fundamentalmente), a pesar que Chile participa con el 41% del total plantado en el mundo. Adicionalmente, las plantaciones se han establecido con el propósito de proporcionar madera para la producción de pulpa. Sin embargo, el precio al productor de la madera de *E. nitens* ha caído en los últimos años,

haciendo difícil para pequeños y medianos propietarios obtener la rentabilidad esperada. De allí que urge la realización de mayor investigación silvícola, que proporcione información de alternativas de manejo distintas al pulpable, para que de esta manera los propietarios forestales puedan evaluar su rentabilidad.

1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Como se ha visto en el punto precedente, son amplias las posibilidades de la especie *E. nitens* para la producción de madera. Sin embargo, aún hay preguntas que es necesario responder para desarrollar planes adecuados de producción silvícola con la especie.

La presente tesis doctoral aporta antecedentes que permiten mejorar la silvicultura de *E. nitens*. Para ello se ha planteado las siguientes preguntas a la hora de su realización:

- ¿*E. nitens* responde a las intervenciones de poda y raleo?. Si esto es efectivo, ¿cuál es la magnitud de la respuesta?
- Para diferentes opciones de manejo (pulpa, aserrable, chapas), ¿cuál es la edad de culminación biológica que permita definir su rotación?
- ¿Las intervenciones silvícolas afectan la forma de la troza basal de los árboles?
- ¿La distribución de la biomasa aérea tiene relación con las intervenciones silvícolas?
- ¿El área foliar de los árboles se ve afectada por las intervenciones silvícolas?. De ser cierto, ¿cuál es la magnitud del efecto?

Por lo tanto, el **objetivo de la investigación** es conocer la respuesta de los árboles de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden sometidos a tratamientos silviculturales de poda y raleo. Interesa evaluar la respuesta de las variables de crecimiento (diámetro, altura, largo copa viva y volumen), variables de forma (coeficiente de esbeltez, factor de forma de Girard) y variables ecofisiológicas (distribución de biomasa aérea y área foliar), a los tratamientos silvícolas aplicados.

ESTUDIOS A REALIZAR

ESTUDIO I. Efecto de la poda y el raleo en el crecimiento y forma del fuste de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden.

Objetivo General

- Evaluar el crecimiento y forma de los árboles de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, como respuesta a la aplicación de tratamientos silviculturales de poda y raleo.

Objetivos Específicos

- Determinar los cambios producidos en las variables de crecimiento (dap, altura, largo copa viva y volumen) como respuesta a la poda y el raleo.
- Determinar los cambios producidos en los indicadores de forma de los árboles (coeficiente de esbeltez y coeficiente de forma de Girard).
- Determinar parámetros silvícolas que permitan establecer criterios de decisión de manejo.

ESTUDIO II: Efecto de la poda y el raleo en la biomasa aérea de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden.

Objetivo General

- Evaluar la cantidad y distribución de biomasa aérea de los árboles de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, como respuesta a la aplicación de diferentes tratamientos silviculturales de poda y raleo.

Objetivos Específicos

- Determinación del peso seco de los componentes de la biomasa aérea (hojas, ramillas, ramas, corteza y fuste) y su distribución en la copa de los árboles.

- Determinar relaciones alométricas entre los diferentes componentes de la biomasa aérea de los árboles.

ESTUDIO III: Efecto de la poda y el raleo sobre el área foliar de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden.

Objetivo General

- Evaluar el área foliar de los árboles de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, como respuesta a la aplicación de diferentes tratamientos silviculturales de poda y raleo.

Objetivos Específicos

- Determinar la cantidad y distribución del área foliar, específica y proyectada, en la copa de los árboles.
- Determinar relaciones alométricas entre variables del árbol y la cantidad de área foliar proyectada y específica.

1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se ha estructurado en capítulos, cada uno de los cuales cubre un aspecto específico. En el Capítulo 1 se define el marco general, se entregan antecedentes científicos de la especie, se presentan los objetivos y la estructura de la tesis.

En el Capítulo 2 se analizan los resultados de un ensayo que busca determinar los efectos de la poda y raleo en las variables de crecimiento y forma de los árboles, en base a mediciones realizadas durante el periodo 1995 - 2003.

El Capítulo 3 entrega los resultados de la medición de un ensayo que busca determinar el efecto de los tratamientos silvícolas sobre la distribución de la biomasa aérea, aspecto relevante en la determinación de la eficiencia de crecimiento de la especie.

El Capítulo 4 analiza el efecto de los tratamientos silvícolas sobre la distribución del área foliar específica y área foliar proyectada. Estos parámetros son necesarios para su utilización en modelos de crecimiento basados en procesos (modelos de crecimiento ecofisiológicos).

En el Capítulo 5 se presenta la discusión general de lo tratado en la tesis y en el Capítulo 6, las conclusiones generales, elaboradas sobre la base de las conclusiones parciales de cada ensayo. Por último, y luego del Capítulo 6, se entrega la bibliografía general de la tesis y anexos.

ESTUDIO I

CAPÍTULO 2

2. CAPÍTULO 2 - EFECTO DE LA PODA Y EL RALEO EN EL CRECIMIENTO Y FORMA DEL FUSTE DE *Eucalyptus nitens* (DEANE & MAIDEN) MAIDEN

2.1. RESUMEN

Chile posee una importante superficie de plantaciones de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden destinada fundamentalmente a la obtención de madera para pulpa. Sin embargo, debido a los permanentes cambios que presenta el mercado de la madera y la necesidad de obtener mayores retornos económicos, se requiere diversificar la producción de la especie obteniendo, por ejemplo, trozas para madera aserrada y chapas. El presente estudio entrega resultados de crecimiento y rendimiento obtenidos en un ensayo de poda y raleo en *E. nitens* después de ocho años de establecido.

El ensayo se realizó en una plantación efectuada el año 1989, ubicada a 1 km de la localidad de Los Álamos, Región del Bío Bío, zona central de Chile, según un arreglo factorial de dos factores: intensidad de raleo (1.100 (sin raleo), 800 y 400 arb ha⁻¹) y severidad de poda (sin poda, 3,5 y 7,0 m) y tres repeticiones en parcelas de 18 x 18 m. Se efectuaron tres mediciones: al establecimiento del ensayo, en octubre de 1995 (6 años de edad), y posteriormente en octubre de los años 1999 (10 años de edad) y 2003 (14 años de edad). En cada oportunidad se midió el diámetro a la altura del pecho (dap) de todos los árboles, altura total (alt), largo copa verde (lcv) y diámetro a 5,27 m de altura en una submuestra de 15 árboles por parcela. Se determinó el factor de forma de Girard (fg), el coeficiente de esbeltez (ce) y el volumen por árbol y acumulado por hectárea.

Ocho años después de establecido el ensayo, sólo se detectó efecto significativo del raleo ($p < 0,05$) en el crecimiento de los árboles. Las parcelas más intensamente raleadas presentan los mayores crecimientos en diámetro y volumen por árbol. A la edad de 14 años, el tratamiento 400 arb ha⁻¹ sin poda presenta el mayor volumen medio por árbol con 0,987 m³ arb⁻¹. A la misma edad, el crecimiento en dap, lcv y volumen por árbol varían significativamente entre los árboles del tratamiento 400 arb ha⁻¹ con los 400 árboles de mayor dap del tratamiento 1.100 arb ha⁻¹. El mayor volumen por hectárea se alcanza en el

tratamiento 1.100 arb ha⁻¹ y 3,5 m de poda con 680,0 m³ ha⁻¹ y un incremento medio anual (IMA) de 48,6 m³ ha⁻¹ año⁻¹. El ce presenta diferencias significativas entre los tratamientos, fluctuando entre 1,05 y 1,27 m/cm, para densidades de 400 y 1.100 arb ha⁻¹, respectivamente. El lev es mayor en los tratamientos de menor densidad residual. A la edad de 14 años, los árboles de los tratamientos de densidad 1.100 arb ha⁻¹ están próximos o han alcanzado la edad de culminación biológica. Los resultados muestran que *E. nitens* es una especie que responde bien a las intervenciones de raleo.

Palabras claves: *Eucalyptus nitens*, Poda, raleo, plantaciones

2.2. INTRODUCCIÓN

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden constituye una especie alternativa para la creación de bosques de rápido crecimiento en un amplio rango de condiciones ambientales (Pinkard y Beadle, 1998b; Lignum, 2003). A nivel mundial, la plantación de *E. nitens* se ha incrementado notoriamente en los últimos años, pasando de 220.000 ha el año 1997 (Tibbits *et al.*, 1997) a 340.000 ha en el año 2004 (Infor, 2004), distribuidas en Australia (Tasmania y Victoria), Chile, Sudáfrica, Nueva Zelanda y España. La mayor extensión (88%) se encuentra en Australia y Chile (Infor, 2004). De las 160.000 ha existentes en Australia, 110.000 ha se localizan en la isla de Tasmania; las 140.000 ha existentes en Chile están localizadas en la zona centro sur del país entre Concepción y Osorno, desde la Región del Bío Bío a la Región de Los Lagos (Infor, 2004).

En Australia y en Chile la madera de *E. nitens* se utiliza mayoritariamente para pulpa (Kube y Raymond, 2002; Smethurst *et al.*, 2003; Infor, 2004). Sin embargo, en Australia desde hace algunos años se realizan esfuerzos para incorporar podas en el manejo de las plantaciones de *E. nitens*, que permitan generar madera de mayor calidad (Pinkard *et al.*, 1995). La empresa Forestal Tasmania ha establecido plantaciones de *E. nitens* para la producción de madera aserrada y madera para chapas (Neilsen y Pinkard, 2000). En Chile, el manejo de *E. nitens* no es una práctica frecuente y son escasos los antecedentes publicados sobre esquemas de manejo orientados a la producción de manera aserrada (Infor, 2004). Hasta ahora sólo se conocen los trabajos de Stöckle (1996) y Muñoz y Espinosa (1999), quienes evaluaron los resultados preliminares de un ensayo de poda y raleo en un rodal de *E. nitens* de 6 años de edad, luego de uno y tres años de establecido, respectivamente, y el de Celhay *et al.* (1999), referido al efecto inicial de la poda en plantaciones de esta especie.

E. nitens es una especie que no presenta poda natural, por lo que la presencia de nudos en la madera es frecuente en árboles no podados (Kube y Raymond, 2002; Infor, 2004). Por consiguiente, la producción de madera de alta calidad libre de nudos requiere podar ramas verdes (Gerrand *et al.*, 1997; Pinkard y Beadle, 1998b). A su vez, la combinación de poda y raleo permite controlar la dimensión de los nudos y la proporción de volumen nudoso,

limitándolo a una porción reducida del corazón del fuste (Neilsen y Pinkard, 2000). Además de su uso como madera aserrable, las plantaciones de *E. nitens* pueden ser manejadas para producir volúmenes de chapas de alto valor, libres de defectos, a costes competitivos (Infor, 2004).

La poda y el raleo generan cambios en el ahusamiento de los árboles (Burkhart y Walton, 1985; Muhairwe, 1994; Pinkard y Beadle, 1998b). Así, se altera la susceptibilidad de los árboles a daño por viento (Cremer *et al.*, 1982; Petty y Swain, 1985; Mitchell, 2000; Moore, 2000; Wonn y O'Hara, 2001) y el rendimiento de la troza basal en madera aserrada o chapas. El ahusamiento, es decir, la tasa de disminución del diámetro del fuste por unidad de largo (Newnham, 1988; Muhairwe, 1994), se puede expresar a través de la razón entre la altura total del árbol y el diámetro a la altura de pecho, también conocida como coeficiente de esbeltez (ce). Gardiner *et al.* (2000) han demostrado a través de modelos, que al aumentar el ahusamiento del árbol se logran árboles más estables. El ahusamiento de la troza basal es posible determinarlo utilizando el factor de forma de Girard (fg), que relaciona el diámetro sin corteza medido a 5,27 m (17,3 pies) y el dap del árbol (Avery y Burkhart, 2002). A mayor fg, más cilíndrica es la troza basal y mayor su rendimiento en aserrío y chapas. Cambios de un punto en esta variable generan diferencias de aproximadamente 3% en el volumen aserrado (Avery y Burkhart, 2002).

En este estudio se presentan resultados del efecto de la poda y el raleo en el crecimiento, rendimiento y forma de una plantación de *E. Nitens* de 14 años de edad, luego de 8 años de establecido el ensayo.

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El ensayo se estableció en la localidad de Los Álamos (37° 38' latitud sur, 73° 27' longitud oeste), provincia de Arauco, Región del Bío Bío, zona central de Chile, en un rodal de *E. nitens* de 4,2 ha de superficie (Figura 2.1). El sitio está localizado a 179,6 m.s.n.m. y

presenta topografía de lomaje suave. El suelo es originado a partir de sedimentos marinos. Son suelos de textura franco arcillosa, ligeramente plásticos y adhesivos en húmedo, duros y compactos en seco. Presentan una fase de erosión fuerte y otra muy erosionada (Carrasco y Millán, 1990) (en Anexo 1 mayor información de suelos). La temperatura varía entre una media máxima en el mes de enero de 23,2 °C y una media mínima en junio de 6,0 °C; el período libre de heladas es de 322 días, con un promedio de una helada por año y 28 días de frío. La precipitación promedio anual es de 1.437 mm con un período seco de cinco meses (Santibáñez y Uribe, 1993).

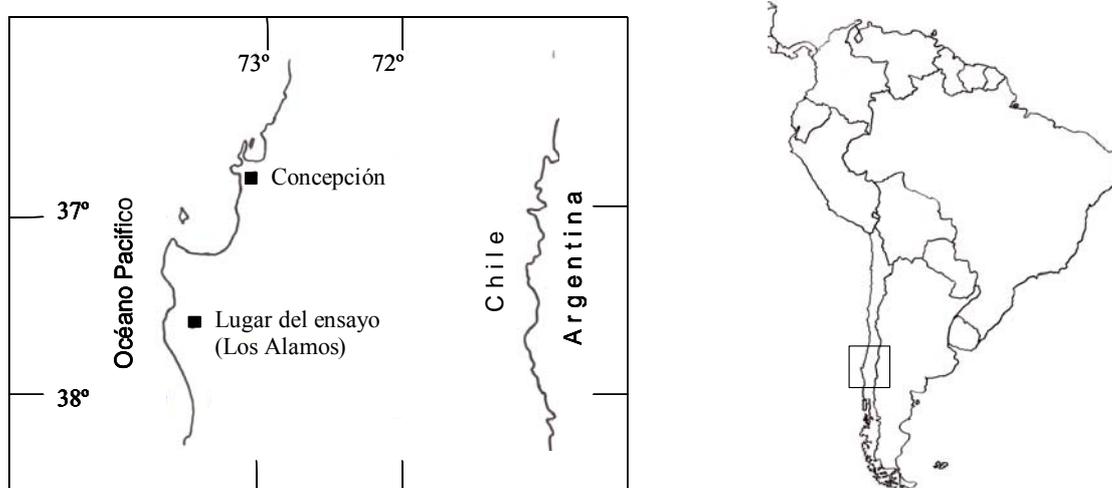


Figura 2.1. Ubicación general del ensayo.

La plantación se realizó en el invierno de 1989 con un espaciamiento de 2,0 x 3,5 m, sobre líneas de subsolado, con plantas producidas de semillas de procedencia Toorongó (Victoria, Australia). Previo a la plantación se efectuó control de malezas. El cultivo anterior fue una plantación de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don), cuyos residuos de cosecha fueron quemados. Al momento de establecer el ensayo (octubre de 1995), el rodal tenía una densidad media de 1.400 arb ha⁻¹ (la que posteriormente fue homogenizada para el ensayo en 1.100 arb ha⁻¹), dap promedio de 15,6 cm y 18,3 m de altura total, largo de copa verde de 8,3 m, razón altura total/dap de 1,17 (coeficiente de esbeltez).

2.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El diseño experimental corresponde a un arreglo factorial de dos factores (altura de poda e intensidad de raleo) en tres niveles cada uno. Los tratamientos resultan de la combinación de tres densidades nominales de rodal (1.100 (sin raleo), 800 y 400 arb ha⁻¹) y tres alturas de poda (0 (sin poda), 3,5 y 7,0 m). Por cada tratamiento (9 en total) se realizaron tres repeticiones, con un total de 27 parcelas, a las que se les asignaron los tratamientos en forma aleatoria. Las parcelas son cuadradas de 324 m² (18 x 18 m) rodeadas por una faja perimetral de aislamiento de 5 m de ancho (en Anexo mayor información). El modelo estadístico del diseño experimental es:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Fórmula 2.1. Modelo estadístico del diseño experimental

donde,

y_{ij} = Representa la observación correspondiente al nivel (i) del factor altura de poda (y) al nivel (j) del factor intensidad de raleo

μ = Efecto constante denominado media global

τ = Efecto producido por el nivel i -ésimo del factor altura de poda

β = Efecto producido por el nivel j -ésimo del factor intensidad de raleo

$\tau\beta$ = Interacción entre el factor altura de poda e intensidad de raleo

i = Niveles de altura de poda (0 (sin poda), 3,5 y 7,0 m de altura)

j = Niveles de intensidad de raleo (1.100 (sin raleo), 800 y 400 arb ha⁻¹)

ε = Error aleatorio $\sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

Las intervenciones de poda y raleo se efectuaron en octubre de 1995, cuando el rodal tenía seis años de edad. Se efectuaron mediciones al establecimiento del ensayo (6 años de edad), octubre de 1999 (10 años de edad) y octubre de 2003 (14 años de edad). Se midió el diámetro a la altura del pecho (dap) y diámetro a 5,27 m de todos los árboles, la altura total (alt) y largo de copa verde (lcv) en una submuestra de 15 árboles por parcela

seleccionados aleatoriamente, abarcando el espectro diamétrico registrado al inicio del estudio, submuestra que se mantuvo en todas las mediciones. El volumen individual se obtuvo utilizando una función de volumen para la especie con un diámetro límite de utilización de 5 cm descrita por Cmpc (1993). La forma de los árboles se analizó utilizando el coeficiente de esbeltez (ce) ($ce = alt/dap$, Prodan *et al.*, 1997) y el factor de forma de Girard (fg) según lo descrito por Avery y Burkhart (2002)

$$fg = \left(\frac{dsc_{5,27}}{dap} \right) \times 100$$

Fórmula 2.2. Factor de forma Girard

donde:

fg : factor de forma de Girard (%)

$dsc_{5,27}$: diámetro sin corteza a 5,27 m (cm)

dap : diámetro altura pecho a 1,30 m (cm)

El diámetro sin corteza a 5,27 m de altura se obtuvo mediante la relación

$dsc_{5,27} = 0,69477 + 0,89568 dcc_{5,27}$; ($n = 189$, $r^2 = 0,9937$) en la que $dcc_{5,27}$ es el diámetro con corteza a 5,27 m (cm))

2.3.3. ANÁLISIS DE DATOS

Todas las variables medidas en cada oportunidad (edades de 6, 10 y 14 años) fueron sometidas a pruebas para determinar su normalidad y homogeneidad de varianzas. El análisis de datos recopilados al establecimiento del ensayo evidenció diferencias significativas en dap. Así, el dap se utilizó como covariable en el análisis de covarianza de la información de dap y volumen obtenida en las mediciones posteriores. En las demás variables se realizó análisis de varianza. La separación de medias, cuando correspondía, se realizó mediante la prueba de Tukey (Steel y Torrie, 1988). En el proceso de datos se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1985). El análisis consideró los 400 árboles de mayor dap por hectárea para los tres niveles de densidad (1.100, 800 y 400 arb

ha⁻¹). La selección de árboles se realizó en base a la distribución diamétrica existente al inicio del ensayo (año 1995). El cálculo del incremento periódico anual (IPA) se realizó considerando tres periodos: el primero hasta los 6 años de edad, el segundo entre los 7 y 10 años de edad, y el tercero entre los 11 y 14 años de edad.

2.4. RESULTADOS

El crecimiento en dap, altura total y volumen medio de los árboles se vio incrementado en todos los tratamientos, particularmente en los espaciamientos más amplios. Lo anterior es más evidente en la medición a los 14 años de edad, donde el tratamiento de raleo más intenso (400 arb ha⁻¹) presentó diferencias significativas en dap, lcv, ce y vol, con respecto al tratamiento testigo (T0), independiente del nivel de poda aplicado (Tabla 2.1). A diferencia del raleo, la poda no afectó el crecimiento de los árboles, independientemente del nivel de raleo aplicado. A la edad de 14 años, para una misma intensidad de raleo, no hay diferencia de dap, altura, lcv, ce, fg y vol, al variar la intensidad de poda (Tabla 2.1).

En la mayoría de los casos, el factor raleo explica las diferencias que se observan entre tratamientos (Tabla 2.2). El factor poda sólo determina en parte la diferencia observada en el volumen alcanzado cuatro años después de su ejecución. No se detectó evidencia de interacción entre poda y raleo (Tabla 2.2).

Tabla 2.1. Efecto de los tratamientos en el tamaño y forma fustal, según edad del rodal (*).

Tratamientos			Edad: 6 años						Edad: 10 años						Edad: 14 años					
Raleo	Poda	Cod	Dap	Alt	Lcv	Ce	Fg	Vol	Dap	Alt	Lcv	Ce	Fg	Vol	Dap	Alt	Lcv	Ce	Fg	Vol
arb ha ⁻¹	m		cm	m	m	m/cm	%	m ³ arb ⁻¹	cm	m	m	m/cm	%	m ³ arb ⁻¹	cm	m	m	m/cm	%	m ³ arb ⁻¹
400	0	T6	17,0ab	17,8a	11,7a	1,07a	s/i	0,148a	27,0a	28,9a	13,0a	1,09c	83,0a	0,597a	32,3a	33,6a	12,6a	1,07c	78,5a	0,987a
400	3,5	T7	17,4a	19,0a	10,9a	1,12a	s/i	0,172a	26,7a	29,0a	12,9ab	1,11c	82,7a	0,626a	31,5a	32,4a	12,3a	1,07c	85,3a	0,963ab
400	7	T8	16,4ab	18,1a	10,0a	1,13a	s/i	0,141a	25,8a	28,1a	12,2ab	1,11c	81,8a	0,540ab	31,1a	32,4ab	12,6a	1,05c	83,2a	0,910ab
800	0	T3	16,0ab	18,1a	10,8a	1,18a	s/i	0,130a	23,0bc	27,7a	11,1ab	1,23abc	82,3a	0,448bcd	26,3bc	30,5ab	9,6b	1,19abc	84,5a	0,652cd
800	3,5	T4	15,8ab	18,4a	10,1a	1,18a	s/i	0,133a	23,5b	28,6a	11,6ab	1,21abc	82,0a	0,503abc	27,3b	32,1ab	10,7ab	1,18abc	72,1a	0,766cb
800	7	T5	15,9ab	18,1a	9,5a	1,14a	s/i	0,140a	23,2b	27,0a	10,7ab	1,15bc	81,6a	0,452bcd	26,8bc	30,4ab	10,0ab	1,11bc	83,8a	0,684cd
1100	0	T0	15,5ab	18,1a	10,4a	1,18a	s/i	0,133a	20,8d	26,2a	9,8b	1,28ab	82,8a	0,357d	23,7c	28,7b	8,8b	1,26ab	83,4a	0,507d
1100	3,5	T1	15,2b	18,1a	10,3a	1,16a	s/i	0,133a	21,2cd	28,2a	11,5ab	1,30a	81,3a	0,434bcd	24,0bc	30,8ab	10,3ab	1,26ab	83,4a	0,612cd
1100	7	T2	16,2ab	18,8a	10,0a	1,18a	s/i	0,150a	21,3cd	27,5a	11,0ab	1,30a	83,2a	0,409cd	24,0bc	29,9ab	9,6b	1,27a	78,5a	0,571cd

(*) Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$). Dap: diámetro altura pecho, Alt: altura total, Lcv: largo copa verde, Ce: coeficiente de esbeltez, Fg: factor de forma de Girard, Vol: volumen por árbol. s/i: Sin información.

Tabla 2.2. Tamaño y forma fustal para cada nivel de poda y raleo del rodal (*).

Factores (**)	Edad: 6 años						Edad: 10 años						Edad: 14 años						
	Dap	Alt	Lcv	Ce	Fg	Vol	Dap	Alt	Lcv	Ce	Fg	Vol	Dap	Alt	Lcv	Ce	Fg	Vol	
	cm	m	m	m/cm	%	m ³ arb ⁻¹	cm	m	m	m/cm	%	m ³ arb ⁻¹	cm	m	m	m/cm	%	m ³ arb ⁻¹	
Raleo	400	16,9a	18,3a	10,9a	1,11a	s/i	0,153a	26,5a	28,6a	12,7a	1,10c	82,6a	0,588a	31,7a	32,8a	12,5a	1,06c	82,3a	0,953a
	800	15,9b	18,2a	10,1a	1,17a	s/i	0,134a	23,2b	27,8a	11,1b	1,19b	82,0a	0,468b	26,8b	31,0b	10,1b	1,16b	80,1a	0,700b
	1100	15,6b	18,3a	10,2a	1,17a	s/i	0,139a	21,1c	27,3a	10,8b	1,29a	82,4a	0,400c	23,9c	29,8b	9,6b	1,27a	81,7a	0,565c
Poda	0	16,2a	18,0a	11,0a	1,14a	s/i	0,137a	23,6a	27,6a	11,3a	1,20a	82,7a	0,467b	27,4a	30,9a	10,3a	1,18a	82,1a	0,715a
	3,5	16,1a	18,5a	10,4ab	1,15a	s/i	0,146a	23,8a	28,6a	12,0a	1,21a	82,0a	0,521a	27,6a	31,8a	11,1a	1,17a	80,3a	0,782a
	7	16,2a	18,4a	9,8b	1,15a	s/i	0,144a	23,4a	27,5a	11,3a	1,19a	82,2a	0,467b	27,3a	30,9a	10,7a	1,14a	81,6a	0,722a
Pr (F)																			
	Raleo	0,0043	0,9580	0,2237	0,1005	s/i	0,1519	<0,0001	0,1235	0,0038	<0,0001	0,494	0,0009	<0,0001	0,0005	<0,0001	<0,0001	0,753	<0,0001
	Poda	0,9902	0,5659	0,0575	0,9332	s/i	0,6286	0,3848	0,1773	0,3382	0,7190	0,273	0,0202	0,8183	0,2562	0,2325	0,4551	0,815	0,0917
	RaleoxPoda	0,2637	0,6386	0,8158	0,7104	s/i	0,3943	0,3734	0,6046	0,5278	0,4229	0,119	0,6128	0,5465	0,2288	0,5310	0,6449	0,087	0,2384

(*) Pr (F) probabilidades límites en ANOVA con dos factores (en negritas valores significativos). Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$). Dap: diámetro altura pecho, Alt: altura total, Lcv: largo copa verde, Ce: coeficiente de esbeltez, Fg: factor de forma Girard, Vol: volumen por árbol. s/i: Sin información.

(**) Factor raleo en arb ha⁻¹ y factor poda en m.

Durante todo el periodo de medición, el grupo de variables constituidas por la alt, ce y fg no varían significativamente entre los árboles del tratamiento 400 arb ha⁻¹ con los 400 árboles de mayor dap del tratamiento 1.100 arb ha⁻¹ (Figura 2.2). Las restantes variables (dap, lcv y vol por árbol) presentan diferencias significativas en algún momento del desarrollo del rodal.

En relación al volumen acumulado al final del periodo de medición (14 años) (Tabla 2.3), el mayor incremento medio anual (IMA) se alcanza en los tratamientos de mayor densidad (T1 y T2) con valores de 48,6 y 46,6 m³ ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Tabla 2.3). El mayor incremento marginal de IMA se registra entre 6 y 10 años de edad de la plantación, con incrementos entre 12,0 y 24,3 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (T8 y T1 respectivamente), que tiende a disminuir a los 14 años, alcanzando el tratamiento T2 valores negativos (-0,9 m³ ha⁻¹ año⁻¹) (Tabla 2.3).

Al igual que el IMA, el incremento periódico anual (IPA) alcanza mayor incremento marginal entre 6 y 10 años de edad de la plantación, con incrementos entre 30,0 y 60,7 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (T8 y T1 respectivamente), para disminuir fuertemente en el período siguiente, alcanzando en todos los tratamientos valores negativos, entre 2,6 y -36,8 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (T8 y T1 respectivamente) (Tabla 2.3).

A medida que aumenta la edad del rodal, el desplazamiento de la distribución diamétrica hacia clases mayores es evidente, especialmente en los espaciamientos más amplios (400 arb ha⁻¹) (Figura 3.3). En esta densidad, la mayor frecuencia de diámetro se desplaza desde la clase de diámetro 18 a la clase 36 cm, es decir, un desplazamiento de 9 clases de diámetro.

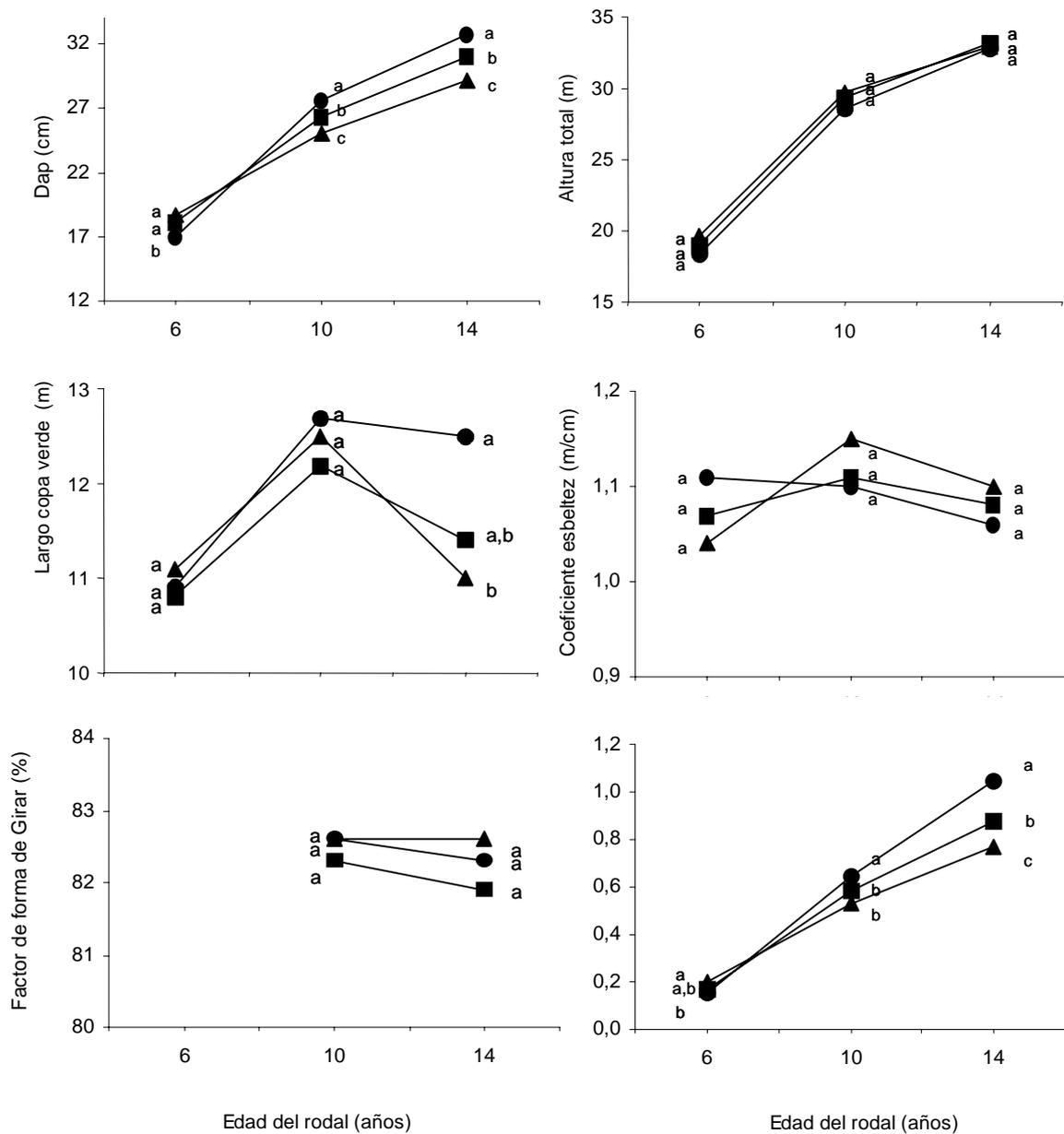


Figura 2.2. Efecto de diferentes densidades residuales en la respuesta de las variables de crecimiento y forma. (▲) Todos los árboles (1.100 arb ha⁻¹), (■) mayores 800 arb ha⁻¹, (●) mayores 400 arb ha⁻¹. Letras diferentes en cada edad indican diferencias significativas (Tukey, p < 0,05). La selección de los árboles de mayor dap se realizó en base a la distribución diamétrica existente al año 1995. En el gráfico de volumen por árbol, a la edad de 6 años, letra *a* le corresponde el símbolo ▲, a las letras *a,b* el símbolo ■ y a la letra *b* el símbolo ●.

Tabla 2.3. Volumen total e incremento volumétrico según tratamiento y edad de rodal (*).

Tratamientos			Edad: 6 años			Edad: 10 años			Edad: 14 años		
Raleo	Poda	Cod	Volumen	IPA	IMA	Volumen	IPA	IMA	Volumen	IPA	IMA
arb ha ⁻¹	m		m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹		m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹		m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	
400	0	T6	62,4	10,4	10,4	258,0	48,9	25,8	426,5	42,1	30,5
400	3,5	T7	74,3	12,4	12,4	264,1	47,4	26,4	406,2	35,5	29,0
400	7	T8	58,0	9,7	9,7	216,7	39,7	21,7	365,1	37,1	26,1
800	0	T3	104,3	17,4	17,4	377,9	68,4	37,8	550,0	43,0	39,3
800	3,5	T4	105,4	17,6	17,6	403,6	74,6	40,4	591,0	46,9	42,2
800	7	T5	110,9	18,5	18,5	367,4	64,1	36,7	555,9	47,1	39,7
1100	0	T0	147,8	24,6	24,6	378,3	57,6	37,8	568,5	47,6	40,6
1100	3,5	T1	146,4	24,4	24,4	486,7	85,1	48,7	680,0	48,3	48,6
1100	7	T2	169,8	28,3	28,3	475,5	76,4	47,5	652,1	44,1	46,6

(*) IMA: Incremento medio anual. IPA: Incremento periódico anual (considera 3 periodos, el primero de 6 años, el segundo entre 7 y 10 años y el tercero entre 11 y 14 años de edad).

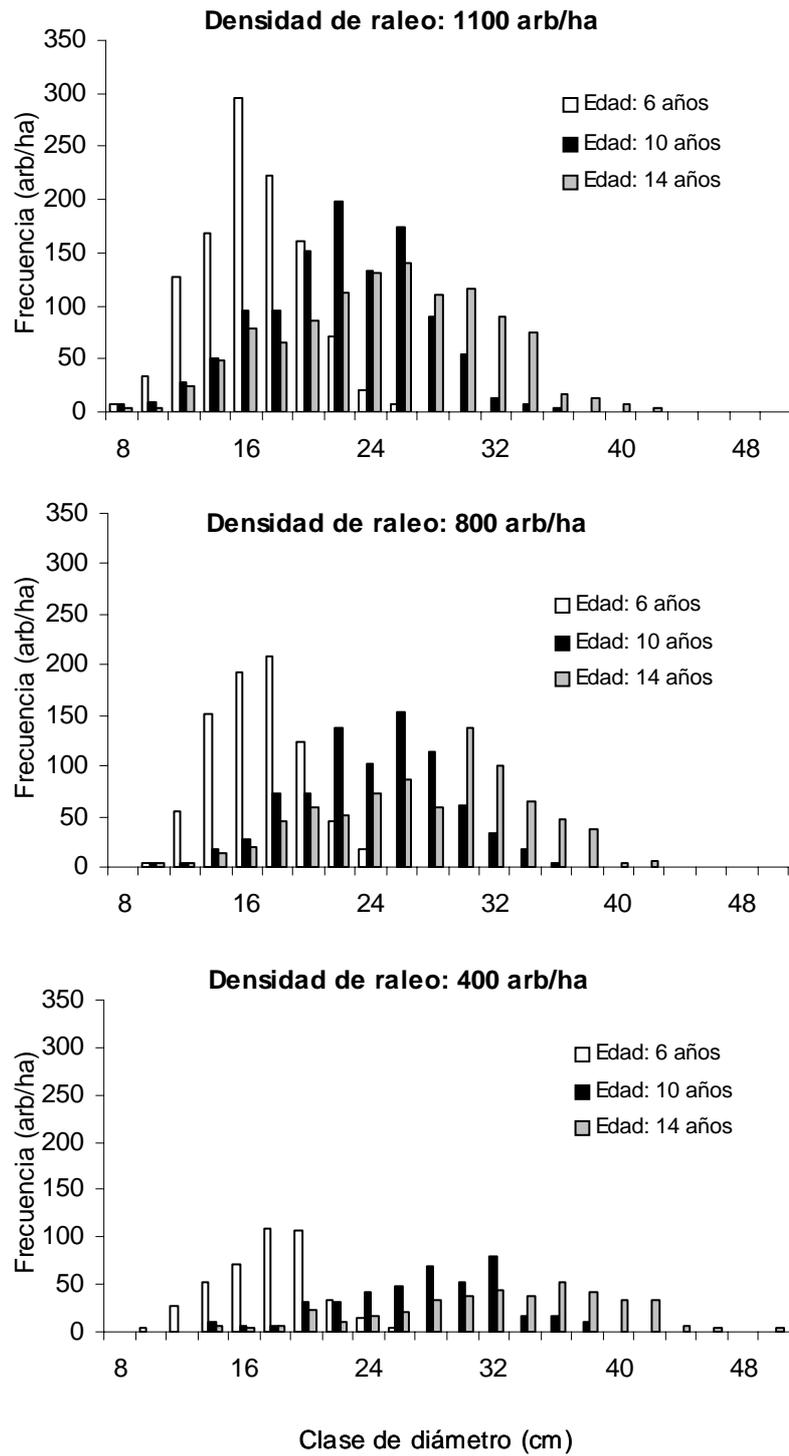


Figura 2.3. Número de árboles por clase de diámetro y tratamiento para cada edad de medición.

2.5. DISCUSIÓN

El raleo afectó la respuesta de las variables dap, altura, lcv, ce y volumen (Tabla 2.1). El dap medio por árbol de los tratamientos de densidad 400 arb ha⁻¹ es significativamente más grande que los tratamientos de mayor densidad, especialmente en el control del año 2003 (edad de 14 años). Similares resultados fueron obtenidos por Muñoz y Espinosa (1999) y Medhurst y Beadle (2000), en estudios con *E. nitens*. La competencia entre los árboles afecta directamente el diámetro, siendo esto evidente en edades adultas. En este ensayo a la edad de 14 años, el dap varía entre 31,7 y 23,9 cm para densidades residuales de 400 y 1.100 arb ha⁻¹, respectivamente (Tabla 2.2). A la edad de 6 años, el dap varía entre 16,9 y 15,6 cm para las mismas respectivas densidades residuales, resultados que son comparables a los obtenidos por Nielsen y Gerrand (1999) en *E. nitens* de 5 años de edad, donde la variación del dap medio fue de 18 a 16,5 cm al pasar de una densidad de 500 a 1.000 arb ha⁻¹. Como es natural, la distribución diamétrica de los árboles del ensayo aumenta a medida que aumenta la edad del rodal. El desplazamiento de la distribución diamétrica hacia clases mayores es evidente en los tratamientos con raleos de menor densidad residual (Figura 2.3). En el tratamiento de menor densidad (400 arb ha⁻¹), la mayor frecuencia de diámetro se desplaza desde la clase de diámetro 18 a la clase 36 cm, es decir, un desplazamiento de 9 clases de diámetro, para los 6 y 14 años de edad respectivamente. En cambio, en la densidad 1.100 arb ha⁻¹ el desplazamiento es de sólo 5 clases de diámetro.

A la edad de 14 años, la altura (alt) es mayor en los tratamientos de menor densidad residual. La menor altura se encuentra en el tratamiento T0 (1.100 arb ha⁻¹ sin poda) con un valor de 28,7 m y la mayor en el tratamiento T6 (400 arb ha⁻¹ sin poda) con 33,6 m. Medhurst *et al.* (2001) encontraron en un ensayo de raleo con *E. nitens*, con mediciones a los 6, 8 y 9 años de edad, que la altura no es afectada por el raleo. Por otra parte, Shepherd (1986) citado por Nielsen y Gerrand (1999) señalan que el efecto de la densidad en la altura media varía según la especie, aumentando en algunos casos con la densidad y en otros disminuyendo. En este ensayo, a los 14 años de edad, los árboles de los tratamientos con mayor densidad (1.100 arb ha⁻¹) son más bajos que los árboles de los tratamientos con menor densidad (400 arb ha⁻¹).

El largo de copa verde (lc_v) se ve afectado por el raleo. A la edad de 10 y 14 años se observa que a mayor densidad residual menor es el lc_v (Tabla 2.2). La diferencia es significativa entre los tratamientos extremos, alcanzando 9,6 m y 12,5 m en los tratamientos de densidad 1.100 y 400 arb ha⁻¹ de densidad residual. Similares resultados obtuvieron Nielsen y Gerrand (1999) en *E. nitens*, al estudiar el efecto de diferentes densidad iniciales (desde 500 a 1.666 arb ha⁻¹) en el crecimiento de los árboles. Adicionalmente, en este ensayo se aprecia una tendencia entre el lc_v con el ahusamiento de los árboles, como lo ha reportado Muhairwe (1994); Pinkard y Beadle (1998b). Se determinó que a mayor lc_v es menor el ahusamiento (según el indicador ce) (Tabla 2.2).

El volumen por árbol es afectado significativamente por el raleo, siendo mayor en los tratamientos de menor densidad (edades 10 y 14 años). A la edad de 6 años y para densidades residuales bajas (400 arb ha⁻¹), el volumen medio por árbol es de 0,153 m³ y no presenta diferencia significativa con las otras densidades estudiadas (Tabla 2.2), estos son resultados comparables a los obtenidos por Nielsen y Gerrand (1999) en Tasmania en un rodal de 5 años de edad y 500 arb ha⁻¹ donde midieron 0,11 m³ arb⁻¹ a los 5 años y a los obtenidos por Pinkard y Neilsen (2003) en el mismo rodal quienes midieron 0,31 m³ arb⁻¹ a los 7 años de edad. Los tratamientos más intensamente raleados (400 arb ha⁻¹), medidos a los 14 años, presentan el mayor volumen con 0,953 m³ arb⁻¹, el cual es un 5,3% superior al volumen individual correspondiente, informado por Infor (2004) en la Tabla de volumen para la especie.

A los 6, 10 y 14 años de edad, la alt, ce y fg no registraron diferencias significativas entre los 400 árboles de mayor dap por hectárea de cada nivel de raleo ensayado (1.100, 800 y 400 arb ha⁻¹) (Figura 2.2). Lo expuesto implica que la tasa de crecimiento de estas variables es independiente de la densidad, al menos hasta la fecha de la última medición (14 años de edad). No ocurre lo mismo con el dap, lc_v y vol, que varían significativamente. A los 10 años, los 400 árboles de mayor dap tienen un 26,8% más de volumen que los árboles de densidad 1.100 arb ha⁻¹. A los 14 años la diferencia llegó a ser de 35,4%.

El volumen acumulado de un rodal, a una edad dada, puede expresarse en términos de IMA e IPA. En este estudio, los mayores volúmenes acumulados a la edad de 14 años de la

plantación, lo alcanzan los tratamientos con mayor densidad ($1.100 \text{ arb ha}^{-1}$), con valores de $680,0$ y $652,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, para T1 y T2, respectivamente, con IMA de $48,6$ y $46,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Tabla 2.3). Estos últimos valores son mayores a los IPA ($48,3$ y $44,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respectivamente), lo que implica que estos tratamientos (T1 y T2) han alcanzado la culminación del incremento medio anual, logrando con ello la edad de rotación biológica del rodal (Daniel *et al.*, 1982). En estudios de disponibilidad de madera de *E. nitens*, el Infor (2004) ha determinado edades de rotación para madera pulpable entre 8 y 12 años, edades ligeramente menores a las establecidas en este estudio. Para madera de mayores dimensiones, como la que se utiliza para aserrío y chapas, se requiere de rotaciones más largas. En este estudio, los tratamientos T6, T7 y T8, que representan las opciones de producción de madera aserrada y chapas, tienen un IPA que es entre 1,2 y 1,4 veces mayor que el IMA. Si se mantiene la tendencia de crecimiento de los últimos 4 años (entre los 10 y 14 años), el IMA se igualaría con el IPA entre los 17 y 18 años de edad. Infor (2004c) sugiere utilizar esquemas de manejo para madera aserrada y chapas, con rotaciones entre 14 y 22 años, según calidad de sitio y manejo silvícola. Si el supuesto señalado para este estudio se mantiene, se obtendrían rotaciones para madera de mayores dimensiones dentro del rango de edades antes indicado.

Los IMA obtenidos en este estudio son comparables a los registrados para *E. nitens* por Barros (1993) en la provincia de Valdivia (entre $34,3$ y $45,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 12 años) y a los obtenidos por Neilsen y Gerrand (1999) ($37 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 16 años) usando un modelo de crecimiento para *E. nitens*, aunque menores a los medidos por Prado y Barros (1991) en la Región del Bío Bío (entre 51 y $77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 15 años). A edades más tempranas (6 y 10 años de edad), los valores registrados en este estudio se encuentran en los rangos señalados por Pinkard y Nielsen (2003) ($27,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la edad de 7 años) y Medhurst *et al.* (2001) ($26,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a la edad de 9 años).

Los coeficientes de forma de los árboles (ce y fg) varían de manera distinta durante el ensayo. El ce varía significativamente entre $1,06$ y $1,27 \text{ m cm}^{-1}$ para las densidades de rodal 400 y $1.100 \text{ arb ha}^{-1}$, respectivamente (Tabla 2.2). Se conoce que los árboles residuales de un raleo son particularmente vulnerables a daños por viento, considerándose que ce menor a 1 m cm^{-1} es adecuado para minimizar el riesgo de daño por viento en

muchas especies (Smith *et al.*, 1997). Pinkard y Neilsen (2003), en rodales de *E. nitens* de 7 años de edad, determinaron que el ce fue de $1,01 \text{ m cm}^{-1}$ para una densidad de $1.667 \text{ arb ha}^{-1}$, pero sólo $0,89 \text{ m cm}^{-1}$ para la densidad de 500 arb ha^{-1} . De acuerdo a ésto, los árboles del ensayo tienen una alta susceptibilidad al daño por viento debido a que todos los tratamientos tienen un ce mayor a 1 m cm^{-1} . En cuanto a fg, fluctúa a la edad de 14 años entre 84,5 y 82,3%, para las respectivas densidades residuales de 1.100 y 400 arb ha^{-1} , aunque sin presentar diferencias estadísticamente significativas (Tabla 2.2). Estos valores son un poco menores a los obtenidos por Larsen (1999) quien señala fg de 89 y 86% en *Pinus echinata* y *Quercus alba*, respectivamente, y mayores a los determinados por Peters *et al.* (1985) entre 76 - 77% en *Pinus radiata*. En este ensayo se esperaba como resultado una tendencia entre fg y densidad, sin embargo, los resultados son erráticos y no es posible obtener conclusiones claras.

La poda sólo tuvo efecto significativo en el volumen por árbol medido a los 10 años de edad (Tabla 2.2). Como se ha determinado en numerosos estudios y con diferentes especies, el efecto de la poda está relacionado fundamentalmente con la oportunidad e intensidad de aplicación (Barret, 1968; Sutton, 1985; Maclaren, 1993). En este ensayo, la poda se practicó cuando la plantación tenía 6 años de edad, en plena fase de competencia intraespecífica, con ramas basales secas o en vías de secarse. Diferentes estudios en *E. nitens* señalan que podar hasta el 50% de la copa verde, en rodales con densidades iniciales de 800 a $1.200 \text{ arb ha}^{-1}$ y edades de 3 a 5 años, no afecta el incremento en altura y diámetro (Pinkard *et al.*, 1995; Pinkard y Beadle, 1998b; Celhay *et al.*, 1999; Nielsen y Pinkard, 2000). Adicionalmente, la poda en *E. nitens* se debe practicar de manera temprana, como lo sugieren Mohammed *et al.* (2000) al señalar que en sitios de alta productividad el cierre de copas se produce tempranamente (2,5 años de edad).

Los índices que miden el ahusamiento (ce y fg) tampoco fueron afectados por la poda (Tabla 2.2). Se conoce que diferencias de ahusamiento pueden resultar de cambios en el crecimiento en diámetro, altura, largo de copa y densidad de rodal (Burkhart y Walton, 1985; Muhairwe, 1994), aunque la poda en *E. nitens* generalmente no afecta el ahusamiento (Pinkard y Beadle, 1998b), como tampoco afecta el ahusamiento en *E. grandis* (Bredenkamp *et al.*, 1980).

2.6. CONCLUSIONES

El análisis de la evidencia presentada señala que *E. nitens* es una especie que responde con facilidad a los tratamientos de raleo, incrementando la tasa de crecimiento en diámetro de los árboles. Luego de ocho años de establecido el ensayo, los árboles en las parcelas más intensamente raleadas (400 arb ha⁻¹) presentan un diámetro significativamente mayor que las no raleadas (1.100 arb ha⁻¹). La poda no tuvo efecto sobre el crecimiento de los árboles, resultado que puede deberse a la tardía oportunidad de intervención. A la edad de 14 años, los árboles de la plantación se encuentran en pleno crecimiento, con incrementos medios anuales en volumen que están próximos o han alcanzado la edad de culminación biológica. Se proyecta que antes de los 18 años, todos los tratamientos habrán alcanzado la culminación de su incremento medio anual. Las intervenciones practicadas determinan coeficiente de esbeltez que supera los niveles mínimos que aseguren que los árboles residuales del raleo no sean vulnerables a daños por viento.

ESTUDIO II

CAPÍTULO 3

3. CAPÍTULO 3 - EFECTO DE LA PODA Y EL RALEO EN LA BIOMASA AÉREA DE *Eucalyptus nitens* (DEANE & MAIDEN) MAIDEN

3.1. RESUMEN

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden es una especie de rápido crecimiento plantada principalmente en Australia (Tasmania) y Chile, con una superficie que representa el 88% del total mundial. En Chile, los pocos estudios de biomasa en *E. nitens* se han concentrado en plantaciones jóvenes, la mayoría sin intervenciones silvícolas. En este trabajo se presentan resultados del efecto de la poda y el raleo en la distribución de la biomasa aérea de una plantación de *E. nitens* de 15 años de edad, luego de 9 años de establecido el ensayo.

El ensayo se realizó en una plantación efectuada el año 1989, ubicada a 1 km de la localidad de Los Álamos, Región del Bío Bío, zona central de Chile, según un arreglo factorial de dos factores (intensidad de raleo y severidad de poda) con 3 repeticiones, en parcelas de 18 x 18 m (324 m²). Utilizando el método del árbol medio, se seleccionó aleatoriamente en cada parcela un árbol. En total se seleccionaron 27 árboles (3 árboles por cada tratamiento). Los árboles fueron trozados en secciones. La copa fue dividida en tercios y se pesó cada componente. Una muestra de cada componente de la biomasa aérea fue pesada en verde y posteriormente secada y nuevamente pesada. La masa seca fustal se determinó en base al volumen de madera de cada sección del árbol y a la densidad básica correspondiente. La masa seca de la copa se estimó en base a fracciones promedios de masa seca/verde por componente y total.

La distribución de biomasa aérea fue afectada por el raleo, siendo significativamente diferente entre los tratamientos de densidad 400 arb ha⁻¹ (792,9 kg arb⁻¹) y 1.100 arb ha⁻¹ (302,4 kg arb⁻¹). El incremento medio anual (IMA) de biomasa para las densidades mencionadas fue de 22,3 y 22,6 t ha⁻¹ año⁻¹. La poda no tuvo efecto sobre la biomasa aérea, resultado que puede deberse a la tardía oportunidad de intervención. La biomasa de la copa se concentró de manera significativa en su sección central. Los modelos alométricos

utilizados para estimar la biomasa de los componentes de la copa incorporan como variable predictora a $\ln(\text{dap}^2)$, resultando con coeficientes de determinación (R^2) de 0,74, 0,63 y 0,80 para hoja, ramilla y rama, respectivamente. Los componentes del fuste (madera y corteza) fueron estimados utilizando la variable independiente $\ln(\text{dap}^2\text{h})$ con R^2 de 0,94 y 0,80 para madera y corteza, respectivamente.

Palabras claves: *Eucalyptus nitens*, biomasa aérea, ecuaciones alométricas, plantaciones de eucalipto

3.2. INTRODUCCIÓN

La biomasa se define como el peso total de los organismos vivos que se encuentran en un ecosistema. Es frecuente separar la biomasa en componentes como: fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta (Schlegel *et al.*, 2000) y su distribución depende de factores como especie, edad, sitio y el tratamiento silvicultural aplicado (Whitehead, 1978; Brix y Mitchell, 1983).

La cantidad de biomasa de cualquier componente aéreo de un árbol se puede determinar a través de un análisis destructivo (Brown *et al.*, 1989) o por estimaciones indirectas utilizando relaciones alométricas entre las dimensiones del fuste y la cantidad de biomasa de cada componente (Landsberg y Gower, 1997). El análisis destructivo es de alto coste y tiempo (Cannell, 1989), de allí que frecuentemente sea necesario aplicar técnicas indirectas de estimación de biomasa (Donoso, 1999). Es así, que los modelos alométricos se constituyen en una valiosa herramienta para evaluar la biomasa en los árboles. Usualmente la variable predictora de biomasa aérea más frecuente es el dap, dada la facilidad y precisión de su medición, y al buen ajuste que se obtiene con esta variable (Pardé, 1980; Cannell, 1989).

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden es una especie de rápido crecimiento, y como se ha señalado anteriormente, ha sido plantada principalmente en Australia (Tasmania) y Chile, con una superficie que representa el 88% del total mundial (340.000 ha) (Infor, 2004). En ambos países, *E. nitens* se utiliza mayoritariamente para pulpa (Kube y Raymond, 2002; Smethurst *et al.*, 2003; Infor, 2004). Sin embargo, desde hace algunos años se realizan esfuerzos para obtener madera de mejor calidad, con el propósito de aumentar su valor económico, incorporando podas y raleos en el manejo de las plantaciones (Pinkard y Beadle, 1998), lo cual tiene efecto en la cantidad y distribución de la biomasa de los árboles (Bartelink, 1998; Medhurst y Beadle, 2000; Rodríguez, 2002; Pinkard y Neilsen, 2003).

Los estudios de biomasa son esenciales en la producción de madera (Cannell, 1989), en la estimación del nivel nutritivo de las plantaciones (Ingerslev y Hallbäcken, 1999; Geldres *et*

al., 2004), en la captación de carbono (Schlegel *et al.*, 2000), para la asignación de intervenciones silvícolas (Cannell, 1989), en la evaluación de los efectos de la cosecha forestal (Teller, 1988) y en el desarrollo de modelos de estructura de bosques (Caldentey *et al.*, 1992). A pesar de la importancia evidente, en Chile, los estudios de biomasa en *E. nitens* son escasos y restringidos a rodales de corta edad. Geldres *et al.* (2004) estimaron la biomasa total y por componente en plantaciones de *E. nitens* entre los 4 y 7 años de edad, Toro (2002) y Aparicio (2001) a los 4 años de edad, Gerding *et al.* (2002) a los 5 años y Muñoz (2002) a los 7 años de edad. No existen estudios de biomasa en plantaciones adultas (en edad de cosecha), como tampoco su relación con las prácticas de manejo.

En este trabajo se presentan resultados del efecto de la poda y el raleo en la distribución de la biomasa aérea de una plantación de *E. nitens* de 15 años de edad, después de 9 años de establecido el ensayo.

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la localidad de Los Álamos (37° 38' latitud sur, 73° 27' longitud oeste), provincia de Arauco, zona central de Chile, en un rodal de *E. nitens* de 4,2 ha de superficie. Mayor información se puede encontrar en el punto 2.3.1.

3.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El diseño experimental corresponde a un arreglo factorial de dos factores (altura de poda e intensidad de raleo) en tres niveles cada uno. Los tratamientos fueron establecidos en octubre de 1995 y resultan de la combinación de tres densidades nominales de rodal (1.100 (sin raleo), 800 y 400 arb ha⁻¹) y tres alturas de poda (0 (sin poda), 3,5 y 7,0 m). Por cada tratamiento (9 en total) se realizaron tres repeticiones, con un total de 27 parcelas, a las que se les asignaron los tratamientos en forma aleatoria. Las parcelas son cuadradas de 324 m² (18 x 18 m) rodeadas por una faja perimetral de aislamiento de 5 m de ancho.

En octubre de 2004 se seleccionó aleatoriamente en cada parcela un árbol que correspondiera a la clase de diámetro medio (Pardé, 1980). En total se seleccionaron 27 árboles (3 árboles por cada tratamiento). A cada árbol se le midió el dap, altura de tocón (ato), altura total (at) y longitud de copa viva (lcv). Los árboles fueron trozados en 7 secciones de igual longitud, obteniendo desde la base de cada una de ellas un disco o rodela de aproximadamente 5 cm de ancho. El conjunto de ramas y hojas (copa) fue dividido en tercios de igual longitud. Las ramas de cada tercio fueron pesadas en verde, posteriormente se separaron y pesaron sus componentes: rama, ramilla (diámetro inferior a 5 mm) y hoja. Las rodela y muestras de ramas, hojas y ramillas, se secaron al horno a 75°C por 48 hr (o hasta obtener peso contante) y posteriormente se pesaron.

La masa seca fustal se determinó en base al volumen de madera de cada sección del árbol y la densidad básica correspondiente. El volumen de cada sección fustal fue calculado a partir de la longitud de la sección y de los diámetros sin corteza en los extremos de cada sección de acuerdo a la fórmula de Smalian (Hush *et al.*, 1982). La densidad básica de la madera se obtuvo relacionando la masa seca de cada rodela y su volumen verde, obtenido por desplazamiento de agua en un recipiente graduado. La masa seca de la copa (ramas, ramillas y hojas) se estimó en base a fracciones promedio de masa seca/verde por componente y total, según el procedimiento descrito por Espinosa y Perry (1987). La estimación del incremento medio anual (IMA) de biomasa de cada tratamiento, se realizó en base a la biomasa obtenida y la densidad de rodal correspondiente (mayor información en Anexo 3).

3.3.3. ANÁLISIS DE DATOS

El primer análisis consistió en determinar la normalidad y homogeneidad de varianza de las variables relacionadas con el tamaño del árbol como dap, altura total y longitud de copa viva, además del peso seco de los distintos componentes de la biomasa aérea. Posteriormente, se analizó el efecto de los tratamientos sobre la cantidad y distribución de biomasa. Para ello, se le realizó un análisis de varianza ($p < 0,05$) y separación de medias, cuando correspondía, mediante la prueba de Tukey (Steel y Torrie, 1988). En el proceso de datos se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 1985).

El segundo análisis consistió en ajustar de modelos de estimación de biomasa. Para ello, se seleccionó el siguiente modelo alométrico (Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997), por ser uno de los más frecuentemente usados en estudios de este tipo:

$$Y = a X^b$$

Fórmula 3.1. Modelo alométrico de Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997)

donde Y es el peso seco del componente aéreo, X variable independiente (dap, altura o alguna de sus transformaciones); a y b son los coeficientes de regresión. Al linealizar el modelo (Formula 3.1) mediante logaritmo se obtiene:

$$\ln(Y) = \ln(a) + b \ln(X)$$

Fórmula 3.2. Modelo alométrico linealizado de Ter-Mikaelian y Korzukhin (1997)

donde \ln es el logaritmo natural.

Utilizando análisis gráfico (scatterplots) se determinó que el peso seco de los componentes tiene relación directa con el tamaño de los árboles (variable independiente), haciendo posible la utilización de un modelo único para estimar el peso seco de cada componente en un amplio rango de tamaño de árbol, esto es incorporando datos de todos los tratamientos (mayor información en Anexo 4). El tamaño del árbol puede ser expresado por el dap, altura (h) o alguna de sus transformaciones. Se probaron para la copa y fuste, como variables independientes, las expresiones logarítmicas $\ln(dap)$, $\ln(h)$, $\ln(dap^2)$, $\ln(dap^2h)$.

3.4. RESULTADOS

En todos los tratamientos, la mayor proporción de la biomasa aérea por árbol se concentró en el fuste y aumentó a medida que disminuye la densidad de rodal. La biomasa aérea promedio por árbol en los tratamientos de densidad 400 arb ha⁻¹ (T6, T7 y T8) fue significativamente mayor que en los tratamientos de densidad 1.100 (T0, T1 y T2) (Tabla

3.1). El factor raleo explica las diferencias de biomasa que se observaron entre tratamientos.

Tabla 3.1. Efecto de los tratamientos en la cantidad y distribución de biomasa aérea seca (*).

Tratamientos			Peso seco copa (kg arb ⁻¹)				Peso seco fuste (kg arb ⁻¹)			Total	IMA
Raleo arb ha ⁻¹	Poda m	Cod	Hojas	Ramillas	Rama	Total	Leño	Corteza	Total	(kg arb ⁻¹)	(t ha ⁻¹ año ⁻¹)
400	0	T6	18,7ab	3,1a	21,4abc	43,2ab	637,2ab	92,5a	729,7a	772,9a	22,3
400	3,5	T7	10,6bc	5,0a	23,1ab	38,7ab	677,4a	76,8ab	754,2a	792,9a	22,3
400	7	T8	20,2a	3,7a	26,3a	50,2a	593,3ab	77,5ab	670,8ab	721,0ab	19,3
800	0	T3	9,8cb	2,5a	13,7bcde	26,0bcd	490,7bc	60,5bcd	551,2bc	577,2bc	32,5
800	3,5	T4	12,2abc	2,0a	17,6abcd	31,8abc	475,0bc	63,8bc	538,8bc	570,6bc	29,4
800	7	T5	12,1abc	1,7a	10,4cde	24,2bcd	410,9cd	48,0cde	458,9cd	483,1cd	26,2
1100	0	T0	3,3c	1,2a	6,0de	10,5d	262,0d	29,9e	291,9d	302,4d	22,6
1100	3,5	T1	5,2c	1,3a	8,1de	14,6cd	334,8cd	30,7e	365,5d	380,1d	28,2
1100	7	T2	4,9c	1,4a	5,5e	11,8d	291,8d	38,3de	330,1d	341,9d	26,0

(*) Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, p<0,05). IMA: Incremento medio anual.

Tabla 3.2. Cantidad y distribución de biomasa según sección de copa y nivel de intervención de raleo y poda (*).

Factores (**)		Peso seco copa (kg arb ⁻¹)				Peso seco fuste (kg arb ⁻¹)			Total (kg arb ⁻¹)
		Hojas	Ramillas	Rama	Total	Leño	Corteza	Total	
Raleo	400	16,5a	4,0a	23,6a	44,0a	635,9a	82,3a	718,2a	762,2a
	800	11,4b	2,0b	13,9b	27,3b	458,9b	57,4b	516,3b	543,6b
	1100	4,5c	1,3b	6,5c	12,3c	296,2c	33,0c	329,2c	341,5c
Poda	0	10,6a	2,3a	13,7a	26,6a	463,3a	61,0a	524,3a	550,9a
	3,5	9,3a	2,8a	16,3a	28,3a	495,8a	57,1a	552,9a	581,2a
	7	12,4a	2,3a	14,1a	28,7a	432,0a	54,6a	486,6a	515,3a
Pr (F)									
	Raleo	<0,0001	0,0030	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Poda	0,1402	0,7169	0,3852	0,7876	0,1030	0,3070	0,1228	0,1367
	RaleoxPoda	0,0318	0,6309	0,2938	0,2300	0,5505	0,0568	0,5034	0,5055

(*) Pr (F) probabilidades límites en ANOVA con dos factores (en negritas valores significativos). Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$). (**) Factor raleo en arb ha⁻¹ y factor poda en m.

A diferencia del raleo, la poda no afectó la biomasa aérea, independientemente del nivel de raleo aplicado (Tabla 3.2). Sólo se detectó evidencia de interacción entre poda y raleo para el componente hoja.

La biomasa de la copa se concentró en su sección central, siendo significativamente diferente entre los tratamientos de densidad 400 arb ha⁻¹ (T6, T7 y T8) y los tratamientos de densidad 1.100 (T0, T1 y T2) (Tabla 3.3). La mayor cantidad de biomasa de hojas y ramillas se concentró en la parte media de la copa, y la biomasa de la rama en la parte baja, independiente del nivel de densidad. El ápice, en todos los casos, presentó la menor cantidad de biomasa (Figura 3.1).

Tabla 3.3. Cantidad y distribución de biomasa de la copa según sección y tratamiento (*).

Tratamientos			Altura total (m)	Largo copa verde (m)	Peso seco copa (kg arb ⁻¹)		
Raleo arb ha ⁻¹	Poda m	Cod			Apice	Centro	Base
400	0	T6	37,1abc	12,6ab	4,8a	21,3a	17,1ab
400	3,5	T7	39,0a	12,1ab	7,5a	17,3a	13,8ab
400	7	T8	35,9abc	14,5a	7,4a	19,4a	23,4a
800	0	T3	37,9ab	12,3ab	4,8a	12,2ab	9,0bc
800	3,5	T4	37,6ab	13,3ab	8,1a	12,1ab	11,6bc
800	7	T5	35,0abc	14,5a	5,4a	13,1ab	5,7bc
1100	0	T0	32,0bc	8,7bc	2,3a	4,3b	3,9c
1100	3,5	T1	35,0abc	9,9abc	2,9a	6,7b	4,9c
1100	7	T2	31,3c	6,4c	1,7a	5,0b	5,2c

(*) Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, p<0,05).

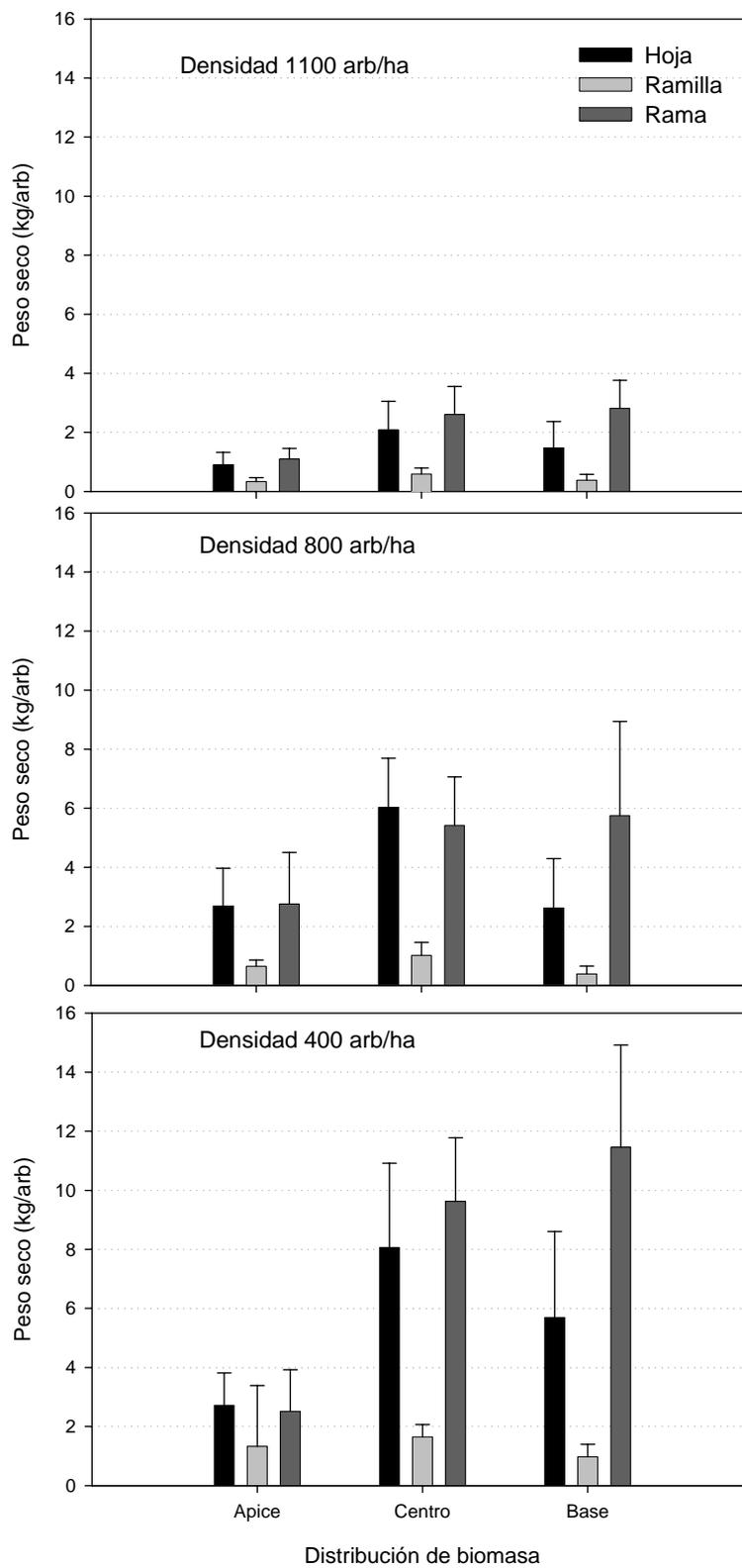


Figura 3.1. Distribución de biomasa de la copa según densidad de rodal.

Las modelos alométricos obtenidos presentan buena correlación entre las variables independientes dap^2 y dap^2h con los componentes de biomasa aérea. El coeficiente de determinación (R^2) fluctúa entre 0,63 para el modelo que estima el logaritmo natural del peso seco de ramilla y 0,95 para el modelo que estima el logaritmo natural del peso seco total (Tabla 3.4). Los modelos alométricos obtenidos presentan residuos que varían de manera aleatoria alrededor de la línea base (Figura 3.2).

Tabla 3.4. Funciones alométricas para los componentes de biomasa aérea (kg) (*)

Funciones alométricas (**)	R^2	EEE
$\text{Ln(PSH)} = -12,060 + 2,1307 \text{ Ln}(dap^2)$	0,74	0,3489
$\text{Ln(PSR)} = -10,167 + 1,6295 \text{ Ln}(dap^2)$	0,63	0,3377
$\text{Ln(PSRa)} = -11,0755 + 2,033 \text{ Ln}(dap^2)$	0,80	0,2815
$\text{Ln(PSM)} = -4,5592 + 1,0374 \text{ Ln}(dap^2h)$	0,94	0,0886
$\text{Ln(PSC)} = -8,3290 + 1,1987 \text{ Ln}(dap^2h)$	0,80	0,2056
$\text{Ln(PST)} = -4,8233 + 1,0793 \text{ Ln}(dap^2h)$	0,95	0,0824

(*) PSH: Peso seco hoja, PSR: Peso seco ramilla, PSRa: Pesos seco rama, PSM: Peso seco madera, PSC: Peso seco corteza, PST: Peso seco total, ln: logaritmo natural, dap: diámetro altura pecho (1,30 m) (cm), h: altura total (m), EEE: Error estándar de estimación, R^2 : Coeficiente de determinación. La unidad de peso seco de los componentes es kg,

(**) Todos los coeficientes son significativos ($p < 0,05$)

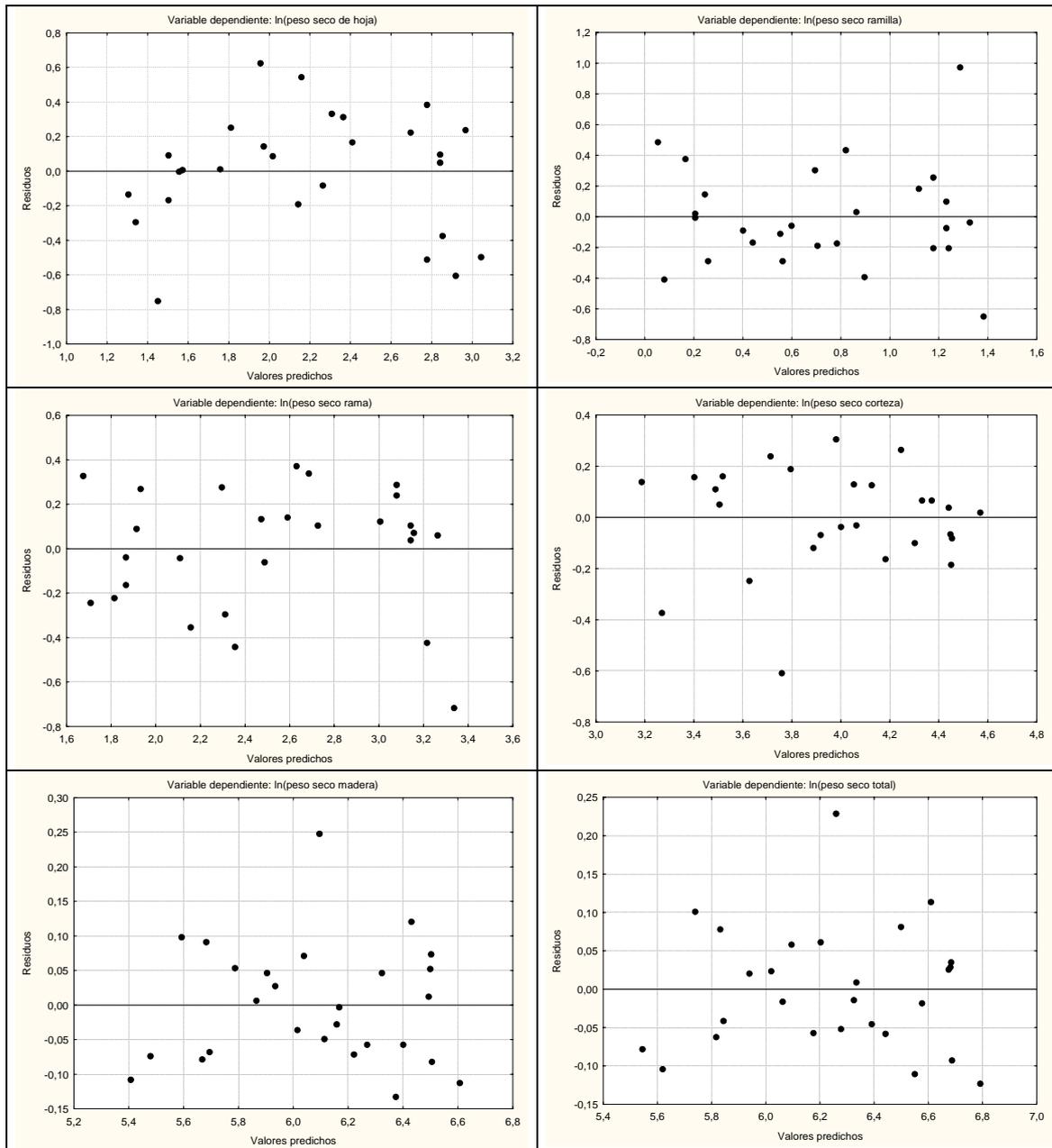


Figura 3.2. Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en los modelos alométricos. ln: logaritmo natural.

3.5. DISCUSIÓN

3.5.1. BIOMASA AÉREA

La biomasa total por árbol varió significativamente entre 792,9 y 302,4 kg arb⁻¹, para los tratamientos T7 (densidad 400 arb ha⁻¹ y poda de 3,5 m) y T0 (densidad 1.100 arb ha⁻¹ sin poda), respectivamente (Tabla 3.1). Esto indica que la biomasa aérea por árbol tuvo una relación inversa con la densidad. Similares resultados han sido obtenidos por Bernardo *et al.* (1998) y Pinkard y Nielsen (2003).

El incremento medio anual (IMA) de biomasa para los tratamientos mencionados alcanzó a 22,3 y 22,6 t ha⁻¹ año⁻¹ (Tabla 3.1). Estos valores son parecidos a los obtenidos en Tasmania por Pinkard y Nielsen (2003) en un rodal de *E. nitens* de 7 años (23,9 t ha⁻¹ año⁻¹) y están dentro del rango señalado por Monteiro y Pereira (1990), citados por Donoso (1999), para *E. globulus* ubicado en el litoral central de Portugal (16 a 24 t ha⁻¹ año⁻¹). La similitud entre valores de biomasa para diferentes densidades ha sido también indicado por Pinkard y Nielsen (2003), quienes determinaron que el IMA de biomasa varió entre 23,9 y 23,6 t ha⁻¹ año⁻¹ para densidades de 833 y 1.010 arb ha⁻¹, respectivamente. *E. nitens* presenta valores de biomasa aérea que son mayores a los obtenidos en otras especies. En *Pinus radiata* Rodríguez (2002) obtuvo 11,4 t ha⁻¹ año⁻¹, en *Pseudotsuga menziesii* Espinosa y Perry (1987) obtuvieron 4,5 t ha⁻¹ año⁻¹, en *Nothofagus dombeyi* Grandon (2004) determinó 7,7 t ha⁻¹ año⁻¹.

En todos los tratamientos la biomasa se concentró en el fuste y varió significativamente de acuerdo a la densidad. La proporción de biomasa fustal varió entre el 94,2% y 96,4% para densidades de 400 y 1.100 arb ha⁻¹ respectivamente (Tabla 3.2). Es decir, a mayor densidad mayor fue la proporción de biomasa en el fuste y por lo tanto, menor la biomasa de la copa. La biomasa del resto de los componentes (hoja, rama, ramilla y corteza) disminuyó significativamente a medida que aumentó la densidad. Al contrario de lo que ocurre con el raleo, la poda no tuvo efecto significativo en la cantidad total y distribución de la biomasa. La interacción entre los factores raleo y poda sólo explica la variación del peso seco de la hoja ($p < 0,0318$).

Resultados similares han sido obtenidos por varios autores en *Eucalyptus*. Monteiro y Pereira (1990), citados por Donoso (1999), determinaron que entre el 85 y 90% de la biomasa aérea en plantaciones de *E. globulus* adultas se concentra en el fuste y corteza, señalando que el porcentaje de corteza con respecto al volumen del fuste varía entre 9-12%. En este ensayo, la proporción de corteza varió entre 12,9% y 11,1% para densidad de 400 y 1.100 arb ha⁻¹ respectivamente (Tabla 3.2).

La biomasa de la copa se concentró en su sección central con proporciones que varían entre 43,2% y 45,6% del total de biomasa de copa, para densidad de 400 y 800 arb ha⁻¹ respectivamente (Tabla 3.3). La biomasa ubicada en la sección central y base de la copa presentó diferencias significativas entre tratamientos. Por el contrario, la biomasa de la sección superior de la copa (ápice) no difiere significativamente entre tratamientos. En promedio, considerando todos los tratamientos, la proporción de biomasa por sección de copa fue de 17,9% para ápice, 44,4% para sección la central y 37,7% para la sección basal. La biomasa de hojas y ramillas se concentró en la parte media de la copa, y la biomasa de la rama en su parte baja, independiente del nivel de densidad (Figura 3.1). Estos resultados difieren con los obtenidos por Medhurst y Beadle (2001), quienes señalan que la proporción de ramas es similar para cada sección de copa en árboles raleados y no raleados

El largo de copa verde (lcv) disminuye significativamente entre tratamiento T8 (400 arb ha⁻¹) y tratamiento T2 (1.100 arb ha⁻¹), con 14,6 y 6,4 m de largo, respectivamente (Tabla 3.3), señalando con ello, que la densidad afecta el largo de la copa. El tratamiento T2 (de mayor densidad) presenta la menor proporción de copa verde con 20,4% de la altura total. Concordantemente con este estudio, Pinkard y Nielsen (2003) determinaron en plantaciones de *E. nitens* de 7 años de edad, proporción de copa verde del 65 y 49% para densidad de 500 y 1.667 arb ha⁻¹, respectivamente.

La biomasa por árbol de los componentes de la copa (hojas, ramillas y ramas) disminuyó al aumentar con la densidad de rodal. La biomasa de hojas disminuyó significativamente desde 16,5 a 4,5 kg arb⁻¹ al variar la densidad de 400 a 1.100 arb ha⁻¹ (Tabla 3.2), cambiando su participación en la biomasa total desde 2,2% a 1,3%. La biomasa de ramas, disminuyó significativamente de 4,0 a 1,3 kg arb⁻¹, lo que equivale a

una reducción desde 3,1% a 1,9% del total. Estos valores se contrastan con los obtenidos en árboles jóvenes, donde la participación de los componentes de la copa en la biomasa total del árbol es mayor. En rodales de 5 años de edad de *E. globulus*, el 18% de la biomasa total corresponde a hojas (Donoso, 1999) y 12% en plantaciones de *E. nitens* de 7 años (Pinkard y Nielsen, 2003). La biomasa de ramas corresponde al 24% del total en rodales de *E. nitens* de 7 años y 500 arb ha⁻¹ (Pinkard y Nielsen, 2003).

La razón de biomasa hoja/rama aporta información acerca de la eficiencia de crecimiento de los árboles. En la medida que la razón hoja/rama se acerca a 1, indicaría mayor cantidad de peso foliar por unidad de peso de rama, es decir, menor proporción de fotosintatos para sostener y mantener el follaje. La razón de biomasa hoja/rama fue de 0,69 y 0,70 kg kg⁻¹ para la densidad 1.100 y 400 arb ha⁻¹, respectivamente (Tabla 3.2). En ambos casos, la razón hoja/rama fue mayor en la sección del ápice con valores de 0,82 y 1,08 kg kg⁻¹ y menor en la base con 0,52 y 0,50 kg kg⁻¹ para las mismas densidades mencionadas. Coincidentemente el tratamiento que presentó mayor biomasa (T7 con 792,9 kg arb⁻¹) tuvo la menor razón hoja/rama con 0,46 kg kg⁻¹ (Tabla 3.1). Los valores mencionados se encuentran en el rango señalado para *Pseudotsuga menziesii* de 0,90 y 0,79 kg kg⁻¹ para densidades de 1.030 y 690 arb ha⁻¹, respectivamente (Espinosa y Perry, 1987), para *Pinus radiata* con 0,62 kg kg⁻¹ y densidad de 489 arb ha⁻¹ (Rodríguez, 2002) y *E. nitens* con 0,50 y 0,55 kg kg⁻¹ para densidades de 500 y 1.667 arb ha⁻¹, respectivamente (Pinkard y Nielsen, 2003).

La poda sólo no tuvo efecto significativo en la cantidad y distribución de biomasa de los componentes aéreos de los árboles (Tabla 3.2), aunque este resultado se debe a las condiciones de establecimiento del ensayo. En varios estudios y con diferentes especies se ha determinado que el efecto de la poda en las distintas variables del árbol se relaciona con la oportunidad e intensidad de su aplicación (Sutton, 1985; Maclaren, 1993). También se ha determinado que la poda influye en los cambios de la morfología de las hojas, arquitectura de la copa y distribución del follaje (Pinkard 1997 citado por Pinkard *et al.*, 1999). En este ensayo, la poda se practicó cuando la plantación tenía 6 años de edad, podando ramas basales secas o en vías de secarse y por lo tanto, sin efecto de importancia sobre el crecimiento del árbol. Mohammed *et al.* (2000) sugiere que la

poda de ramas verdes en *E. nitens* se realice tempranamente, antes del cierre de copas (2,5 años de edad), especialmente en sitios de alta productividad.

3.5.2. FUNCIONES ALOMÉTRICAS

El modelo utilizado entregó buenos ajustes entre biomasa aérea y tamaño de los árboles. Esto también ha sido reportado para diferentes especies, como *Pinus radiata* (Rodríguez, 2002), *Pseudotsuga menziesii* (Espinosa y Perry, 1987), *Nothofagus dombeyi* (Grandon, 2004), *E. globulus* (Donoso, 1999) y *E. nitens* (Pinkard y Nielsen, 2003).

La biomasa seca de los componentes de la copa tiene mejor ajuste con la variable predictora $\ln(\text{dap}^2)$. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) de 0,63, 0,74 y 0,80 para los logaritmos que estiman ramilla, hoja y rama, respectivamente (Tabla 3.4). Los componentes del fuste (madera y corteza) presentan mejores ajustes con la variable independiente $\ln(\text{dap}^2\text{h})$ resultando con R^2 de 0,94 y 0,80 para los logaritmos que estiman madera y corteza, respectivamente. Todos los modelos presentaron coeficientes regresionales significativos ($p < 0,05$). El análisis de residuos de los modelos determinó que éstos fluctúan de manera aleatoria alrededor de la línea base (Figura 3.2). Esto señala que los errores tienen varianza constante y que los residuos son independientes del valor de la variable predictora.

3.6. CONCLUSIONES

La biomasa aérea total y por componente es afectada por el raleo, siendo mayor en raleos más intensos (espaciamiento más amplio). La poda no tuvo efecto sobre la biomasa aérea, resultado que puede deberse a la tardía oportunidad de intervención. La biomasa de la copa se concentra de manera significativa en su sección central.

ESTUDIO III

CAPÍTULO 4

4. CAPÍTULO 4 - EFECTO DE LA PODA Y EL RALEO EN EL ÁREA FOLIAR DE *Eucalyptus nitens* (DEANE & MAIDEN) MAIDEN

4.1. RESUMEN

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden es una especie de rápido crecimiento plantada principalmente en Australia (Tasmania) y Chile, con una superficie que representa el 88% del total mundial. En Chile, no hay estudios de área foliar en *E. nitens*. En este estudio se presentan resultados del efecto de la poda y el raleo en el índice de área foliar y área foliar específica de una plantación de *E. nitens* de 15 años de edad, luego de 9 años de establecido el ensayo.

El ensayo se realizó en una plantación efectuada el año 1989, ubicada a 1 km de la localidad de Los Álamos, Región del Bío Bío, zona central de Chile, según un arreglo factorial de dos factores (intensidad de raleo y severidad de poda) con 3 repeticiones, en parcelas de 18 x 18 m (324 m²). Utilizando el método del árbol medio, se seleccionó aleatoriamente en cada parcela un árbol. En total se seleccionaron 27 árboles (3 árboles por cada tratamiento). Los árboles fueron volteados y la copa dividida en tercios de igual longitud. Para cada tercio se determinó el peso verde de hojas. Se obtuvo una muestra de cada tercio y fue determinado su peso verde. En laboratorio la muestra fue secada. Una submuestra de hojas verdes se utilizó para determinar la superficie foliar utilizando el medidor Li-Cor 3100, luego se secaron y pesaron, determinándose así el Área Foliar Específica (AFE). El área foliar de cada tercio de la copa fue calculada multiplicando su biomasa foliar por el AFE. El área foliar del árbol completo correspondió a la sumatoria de las áreas foliares de sus respectivos tercios, que al proyectarse sobre el área media de suelo que ocupan los árboles en la parcela, determinó el Índice de Área Foliar (IAF).

El área foliar proyectada alcanzó un máximo en tratamientos de densidad 400 arb ha⁻¹ (64,7 m² arb⁻¹). El índice de área foliar es mayor en tratamientos de densidad 800 arb ha⁻¹ (3,48 m² m⁻²) y menor en tratamientos de densidad 1.100 arb ha⁻¹ (2,10 m² m⁻²). El área foliar específica es mayor en tratamientos de densidad 1.100 arb ha⁻¹ (43,2 cm² g⁻¹) (espaciamiento más reducido). La poda no tuvo efecto sobre área foliar proyectada,

índice de área foliar como tampoco sobre el área foliar específica, resultado que puede deberse a la tardía oportunidad de intervención. El área foliar proyectada e índice de área foliar se concentran en la sección central de la copa y el área foliar específica en la sección basal de la copa. El modelo alométrico utilizado para estimar el área foliar proyectada, por sección de copa y total, utiliza como variable predictora el diámetro en la base de la copa viva (en su expresión logarítmica), obteniendo coeficientes de determinación (R^2) que varía entre 0,50 y 0,82. El índice de área foliar de la copa, por sección y total, incorpora como variable predictora al diámetro tocón y diámetro en la base de la copa viva, resultando R^2 que varía entre 0,21 y 0,46, aunque puede mejorarse si se excluye del análisis los datos de los tratamientos que aún no cierran su dosel (densidad 400 arb ha⁻¹). Los modelos alométricos que predicen el área foliar específica de la copa, por sección y total, utilizan la variable predictora diámetro de tocón, logrando R^2 que varía entre 0,54 y 0,73.

Palabras claves: *Eucalyptus nitens*, índice de área foliar, área foliar específica, plantaciones de eucalipto

4.2. INTRODUCCIÓN

La cantidad de luz interceptada por el follaje es importante para el crecimiento de los árboles (Beadle *et al.*, 1995) y por lo tanto, para la productividad y dinámica de los rodales (Oliver y Larson, 1996). El Índice de Área Foliar (IAF) relaciona la extensión del follaje por unidad de superficie (Perry, 1994; Cherry *et al.*, 1998; Smethurst *et al.*, 2003), siendo considerado un buen indicador de la capacidad de la copa para absorber la radiación fotosintéticamente activa (Perry, 1994).

Los métodos directos de estimación del IAF, como muestreo destructivo de ramas y árboles representativos, son lentos y costosos, pero, proporcionan alta precisión (Cherry *et al.*, 2002). En otros casos son utilizados métodos indirectos, como relaciones alométricas entre área foliar y características del árbol (Norman y Campbell, 1989), uso de radiómetros del tipo Li-cor Lai-2000 (Cherry *et al.*, 1998; Battaglia *et al.*, 1998), fotografía hemisférica (Keane *et al.*, 2005) y guías visuales para su uso comparativo al interior de la plantación (Cherry *et al.*, 2002).

El IAF está fuertemente relacionado con el nivel de interceptación de luz, transpiración y fotosíntesis neta en la copa, y varía de acuerdo a las condiciones ambientales en las cuales se encuentran las plantaciones (Battaglia *et al.*, 1998; Amponsah *et al.*, 2005), a la edad (Jerez *et al.*, 2005), a la época del año (Simioni *et al.*, 2004) y a las características de la plantación (Rodríguez, 2002). Por lo tanto, la estimación del IAF puede ser usada como una herramienta de manejo de gran valor para monitorear y predecir el crecimiento de la plantación (Cherry *et al.*, 2002). Aspecto de importancia en el manejo de plantaciones de rápido crecimiento.

La mayoría de los modelos de crecimiento de procesos consideran como indicador de la interceptación de luz el área foliar horizontal de la vegetación. Esto es una aproximación adecuada cuando hay cierre total de copas, pero no lo es, cuando hay discontinuidad de copas, como es el caso de raleos (Medhurst y Beadle, 2001). Cuando los rodales han sido sometidos a raleos, se debería considerar además, la distribución horizontal del IAF y su evolución hasta el cierre de copas.

Eucalyptus nitens (Deane & Maiden) Maiden es una especie de rápido crecimiento y como se ha señalado anteriormente, ha sido plantada principalmente en Australia (Tasmania) y Chile, con una superficie que representa el 88% del total mundial (340.000 ha) (Infor, 2004). En ambos países, *E. nitens* se utiliza mayoritariamente para pulpa (Kube y Raymond, 2002; Smethurst *et al.*, 2003; Infor, 2004). Sin embargo, en Australia, desde hace algunos años se realizan esfuerzos para incorporar podas en el manejo de las plantaciones, que permita generar madera de mayor calidad (Pinkard *et al.*, 1995). En Chile, el manejo de *E. nitens* no es una práctica frecuente (Infor, 2004), razón por la cual, no hay estudios publicados que relacionen las prácticas silvícolas con el área foliar de los árboles, especialmente a edades adultas.

En este estudio se presentan resultados del efecto de la poda y el raleo en la distribución del área foliar, proyectada y específica, de una plantación de *E. nitens* de 15 años de edad, luego de 9 años de establecido el ensayo.

4.3. METODOLOGÍA

4.3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la localidad de Los Álamos (37° 38' latitud sur, 73° 27' longitud oeste), provincia de Arauco, zona central de Chile, en un rodal de *E. nitens* de 4,2 ha de superficie. Mayor información se puede encontrar en el punto 2.3.1.

4.3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El diseño experimental corresponde a un arreglo factorial de dos factores (altura de poda e intensidad de raleo) en tres niveles cada uno. Los tratamientos fueron establecidos en octubre de 1995 y resultan de la combinación de tres densidades nominales de rodal (1.100 (sin raleo), 800 y 400 arb ha⁻¹) y tres alturas de poda (0 (sin poda), 3,5 y 7,0 m). Por cada tratamiento (9 en total) se realizaron tres repeticiones, con un total de 27 parcelas, a las que se les asignaron los tratamientos en forma aleatoria.

Las parcelas son cuadradas de 324 m² (18 x 18 m) rodeadas por una faja perimetral de aislamiento de 5 m de ancho.

En octubre de 2004 se seleccionó aleatoriamente en cada parcela un árbol que correspondiera a la clase de diámetro medio (Pardé, 1980). En total se seleccionaron 27 árboles (3 árboles por cada tratamiento). Previo al derribo de los árboles, se midió el dap a cada uno de los árboles. Una vez derribados, se midió el diámetro del fuste en la base de copa viva, longitud de copa viva y altura total. La copa fue dividida en tercios de igual longitud. Para cada tercio se determinó el peso verde de hojas. Se obtuvo una muestra de hojas de cada tercio y se determinó el peso verde. En laboratorio las muestras fueron secadas al horno a 75 °C por 48 hr. Una submuestra de hojas verdes fueron usadas para determinar la superficie foliar utilizando el medidor Li-Cor 3100, se secaron y se determinaron sus biomásas. Se determinó el área foliar específica (AFE) de cada submuestra, como la razón área foliar verde / biomasa foliar seca en cm² gr⁻¹. La biomasa foliar de cada tercio de la copa fue determinada multiplicando el peso verde por la razón peso seco de hojas / peso verde de hojas. El área foliar (AFP) de cada tercio de la copa fue calculada multiplicando su biomasa foliar por el AFE. El índice de área foliar (IAF) del árbol completo correspondió a la sumatoria de las áreas foliares de sus respectivos tercios, proyectada sobre el área media de suelo que ocupan los árboles en la parcela.

4.3.3. ANÁLISIS DE DATOS

Todas las variables fueron sometidas a pruebas para determinar su normalidad y homogeneidad de varianzas. El efecto de los tratamientos sobre la cantidad y distribución del IAF y el área foliar específica se determinó mediante análisis de varianza ($p < 0,05$). La separación de medias, cuando correspondía, se realizó utilizando la prueba de Tukey (Steel y Torrie, 1988). Mediante análisis de regresión lineal se ajustó el IAF y AFE como variables dependientes y las variables predictoras dap, diámetro tocón, diámetro en la base de la copa viva, largo copa viva, altura total, además de sus transformaciones cuadráticas y logarítmicas. En el proceso de datos se utilizó el programa estadístico StatSoft, Inc. (2001).

4.4. RESULTADOS

El área foliar proyectada (AFP) según tratamiento se presenta en la Tabla 4.1. Como era de esperar el tratamiento con menor AFP es T0 ($14,6 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$) y significativamente diferente con el tratamiento T8 que presenta el mayor valor de AFP ($77,1 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$). En todos los tratamientos, el AFP se concentra en la sección central de la copa (Tabla 4.1). El AFP fue afectada significativamente por el raleo, siendo mayor en tratamientos de densidad 400 arb ha^{-1} (Tabla 4.2). En cambio la poda no tuvo efecto significativo sobre el AFP total o sobre el AFP de cada sección de copa. La interacción entre raleo y poda tuvo efecto significativo en el AFP total y AFP de la base de la copa. Para todos los niveles de raleo y poda estudiados, el AFP se concentra en la sección central de la copa (Tabla 4.2).

El índice de área foliar (IAF) promedio por árbol del tratamiento T4 ($3,84 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) es significativamente mayor al del tratamiento T0 ($1,63 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), siendo los únicos tratamientos que presentan diferencias significativas (Tabla 4.3). En todos los tratamientos, la mayor proporción del IAF por árbol se concentró en el tercio central de la copa. En cuanto al área foliar específica (AFE), no presenta diferencias significativas entre tratamientos. El mayor valor se alcanzaron el tratamiento T0 ($46,0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$) y el menor en el tratamiento T5 ($36,6 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$). En los tratamientos de densidad 400 arb ha^{-1} , el AFE se concentra en la base de la copa. En los restantes tratamientos no se observa una tendencia clara (Tabla 4.3 y Figura 4.1).

El factor raleo afectó el IAF de la sección ápice y centro ($p=0,002$ y $0,0012$ respectivamente) y el AFE de la sección ápice ($p=0,0353$). A diferencia del raleo, la poda no afectó el IAF, como tampoco el AFE, independientemente del nivel de raleo aplicado (Tabla 4.4). No se detectó evidencia de interacción entre poda y raleo.

Tabla 4.1. Cantidad y distribución del área foliar proyectada (AFP) según sección de copa y tratamiento (*).

Tratamientos			Área foliar proyectada ($\text{m}^2 \text{arb}^{-1}$)			
Raleo arb ha^{-1}	Poda m	Cod	Apice	Centro	Base	Total
400	0	T6	10,2a	39,0a	24,0ab	73,2a
400	3,5	T7	11,0a	22,1abcd	12,0bc	43,9abc
400	7	T8	9,8a	33,4ab	32,6a	77,0a
800	0	T3	7,6a	19,2bcd	9,3bc	36,0bc
800	3,5	T4	14,0a	23,5abcd	12,7bc	50,1ab
800	7	T5	10,1a	25,5abc	8,2bc	43,8abc
1100	0	T0	3,7a	7,1d	3,9c	14,6c
1100	3,5	T1	5,6a	10,5cd	6,2c	22,3bc
1100	7	T2	2,7a	8,6cd	8,3bc	19,5bc

(*) Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Tabla 4.2. Cantidad y distribución del área foliar proyectada (AFP) según sección de copa y nivel de intervención de raleo y poda (*).

Factores (**)		Área foliar proyectada (m ² arb ⁻¹)			
		Apice	Centro	Base	Total
Raleo	400	10,3a	31,5a	22,9a	64,7a
	800	10,6a	22,7b	10,0b	43,3b
	1100	4,0b	8,7c	6,1b	18,8c
Poda	0	7,1a	21,8a	12,4a	41,3a
	3,5	9,8a	18,7a	10,3a	38,8a
	7	7,9a	22,6a	16,3a	46,8a
Pr (F)					
	Raleo	0,0055	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	Poda	0,4192	0,4094	0,1378	0,3590
	RaleoxPoda	0,6403	0,0513	0,0279	0,0226

(*) Pr (F) probabilidades límites en ANOVA con dos factores (en negritas valores significativos). Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$). (**) Factor raleo en arb ha⁻¹ y factor poda en m.

Tabla 4.3. Efecto de los tratamientos en la cantidad y distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) (*).

Tratamientos			Índice de Área Foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)				Área Foliar Específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)			
Raleo arb ha^{-1}	Poda m	Cod	Apice	Centro	Base	Total	Apice	Centro	Base	Total
400	0	T6	0,44ab	1,68ab	1,04a	3,16ab	37,3a	39,4a	40,0a	38,9a
400	3,5	T7	0,42ab	0,93ab	0,5a	1,84ab	40,4a	40,7a	44,1a	41,6a
400	7	T8	0,44ab	1,34ab	1,31a	3,09ab	36,7a	38,1a	38,9a	38,0a
800	0	T3	0,64ab	1,61ab	0,78a	3,03ab	37,6a	37,6a	37,2a	37,4a
800	3,5	T4	1,05b	1,82ab	0,97a	3,84b	40,7a	40,9a	43,2a	41,6a
800	7	T5	0,82ab	2,08b	0,67a	3,57ab	38,4a	35,7a	36,5a	36,6a
1100	0	T0	0,41ab	0,79a	0,44a	1,63a	46,9a	45,4a	45,8a	46,0a
1100	3,5	T1	0,60ab	1,15ab	0,68a	2,44ab	42,2a	41,9a	45,0a	43,1a
1100	7	T2	0,30a	0,97ab	0,94a	2,21ab	40,4a	41,5a	39,6a	40,4a

(*) Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Tabla 4.4. Cantidad y distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) según sección de copa y nivel de intervención de raleo y poda (*).

Factores (**)		Índice de Área Foliar (m ² m ⁻²)				Área Foliar Específica (cm ² g ⁻¹)			
		Apice	Centro	Base	Total	Apice	Centro	Base	Total
Raleo	400	0,43a	1,32a	0,95a	2,70ab	38,1a	39,4a	41,0a	39,5a
	800	0,84b	1,84b	0,81a	3,48b	38,9ab	38,0a	39,0a	38,5a
	1100	0,44a	0,97a	0,69a	2,10a	43,2b	42,9a	43,5a	43,2a
Poda	0	0,50a	1,36a	0,75a	2,61a	40,6a	40,8a	41,0a	40,8a
	3,5	0,69a	1,30a	0,72a	2,71a	41,1a	41,2a	44,1a	42,1a
	7	0,52a	1,46a	0,97a	2,96a	38,5a	38,4a	38,3a	38,3a
Pr (F)									
	Raleo	0,0050	0,0012	0,4430	0,0046	0,0353	0,2153	0,3455	0,1844
	Poda	0,2520	0,7080	0,3977	0,6220	0,3704	0,5747	0,1854	0,3387
	RaleoxPoda	0,5880	0,1599	0,1972	0,1332	0,3860	0,8782	0,8914	0,8033

(*) Pr (F) probabilidades límites en ANOVA con dos factores (en negritas valores significativos). Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas (Tukey, p<0,05). (**) Factor raleo en arb ha⁻¹ y factor poda en m.

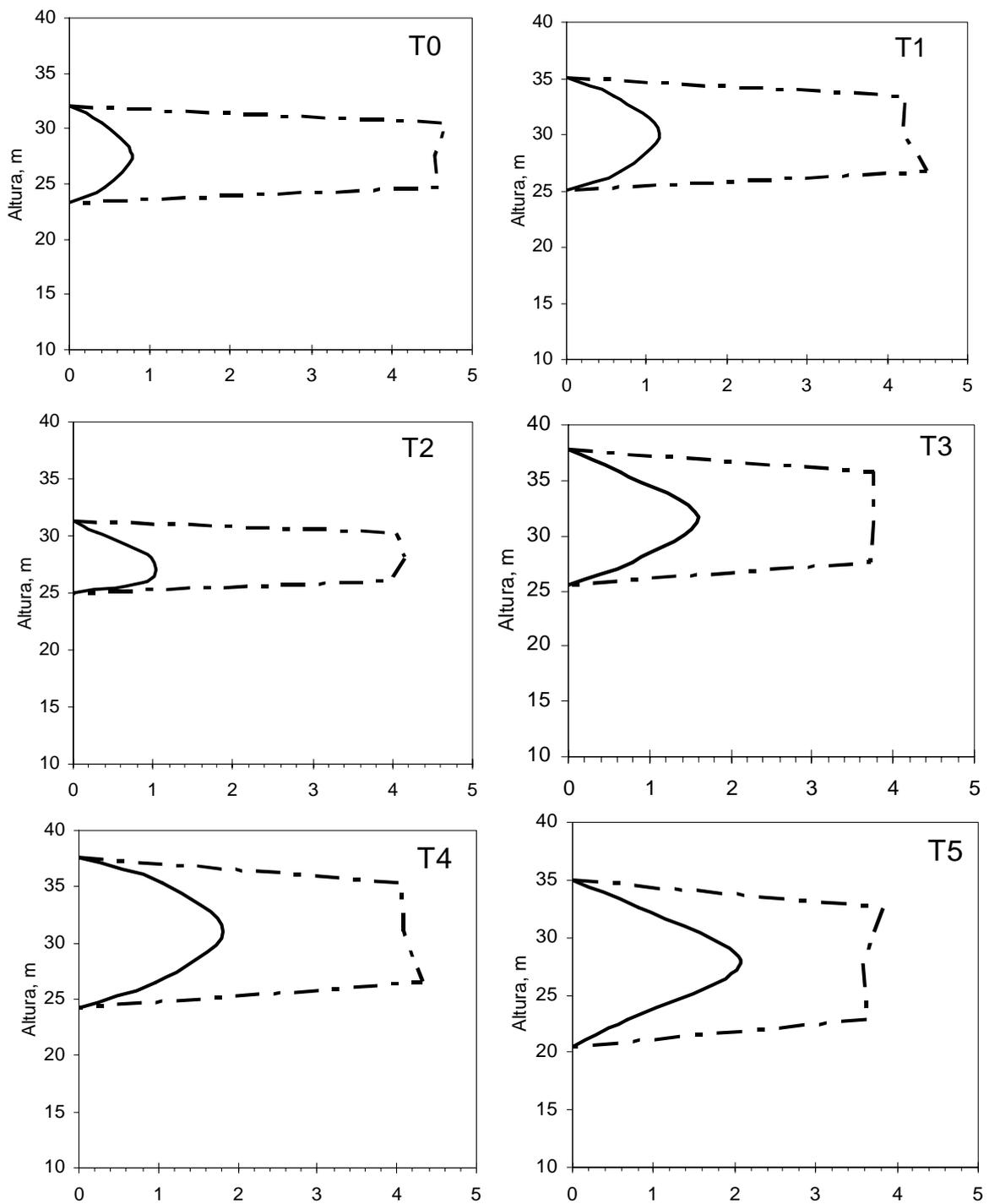


Figura 4.1. Distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) según tratamiento, sección y altura media en la copa. (—) Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), (---) Área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$).

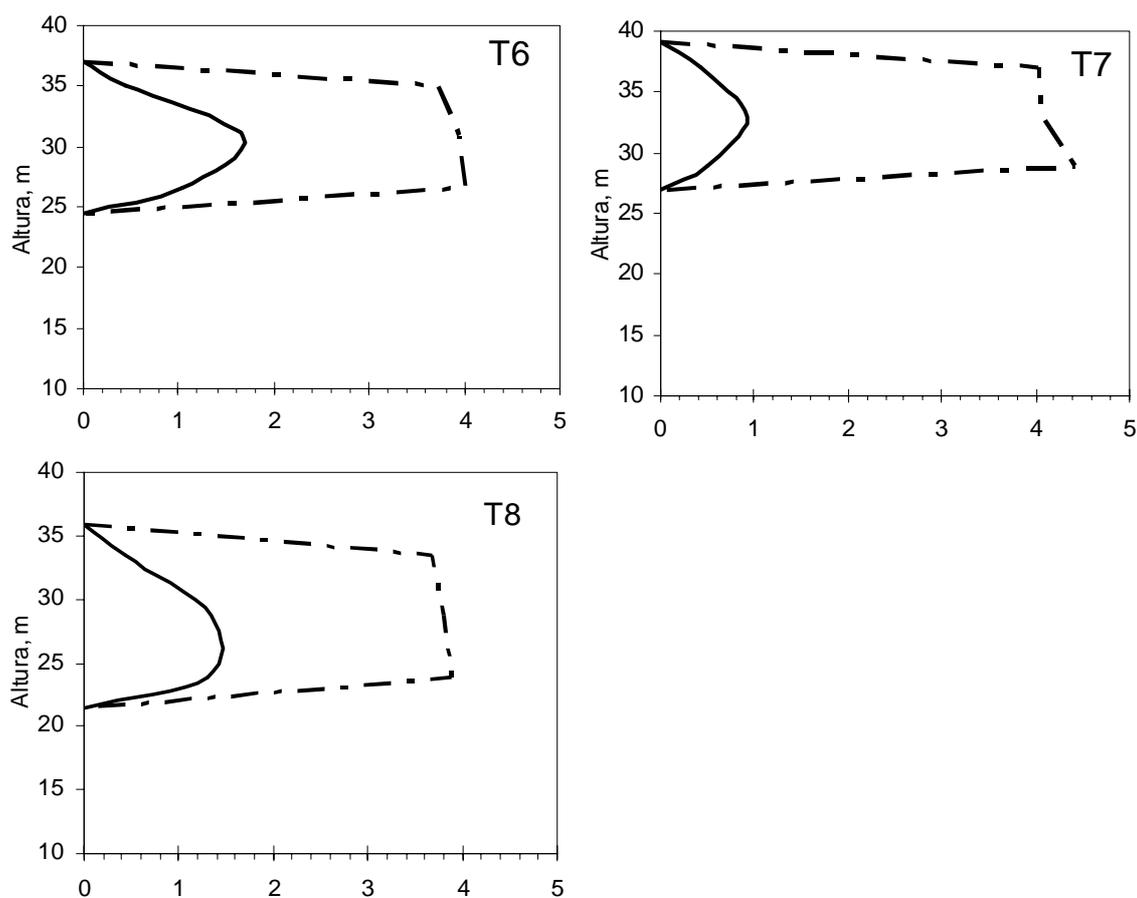


Figura 4.1. (continuación). Distribución del índice de área foliar (IAF) y área foliar específica (AFE) según tratamiento, sección y altura media en la copa. (—) Índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), (---) Área foliar específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$).

Las variables predictoras que mejor explican las variables dependientes IAF y AFE son el diámetro de tocón (DT) y diámetro en la base de la copa viva (DBCW). La variable predictoras del área foliar proyectada (AFP) es el DBCW, transformado en su expresión logarítmica. El modelo alométrico para estimar AFP presenta mejor correlación que los modelos para estimar IAF y AFE. El coeficiente de determinación (R^2) fluctúa entre 0,21 para el modelo que estima el índice área foliar y 0,82 del modelo que estima el área foliar proyectada (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Funciones alométricas por sección y total de copa (*)

Funciones alométricas (**)	R ²	EEE
Área foliar proyectada		
$\ln(\text{AFPA}) = -2,33819 + 1,65736 \ln(\text{DBC V})$	0,50	0,4597
$\ln(\text{AFPC}) = -2,81504 + 2,20295 \ln(\text{DBC V})$	0,80	0,3043
$\ln(\text{AFPB}) = -3,34136 + 2,17427 \ln(\text{DBC V})$	0,53	0,5713
$\ln(\text{AFT}) = -1,82579 + 2,09631 \ln(\text{DBC V})$	0,82	0,2683
Índice de área foliar		
$\text{IAFA} = 1,107156 - 0,040602 \text{DT} + 0,062450 \text{DBC V}$	0,21	0,2901
$\text{IAFC} = 1,164349^\dagger - 0,043661 \text{DT}^\dagger + 0,125221 \text{DBC V}$	0,32	0,4716
$\text{IAFB} = 0,329752^\dagger - 0,019121 \text{DT}^\dagger + 0,083647 \text{DBC V}$	0,27	0,3894
$\text{IAFT} = 2,601257 - 0,103384 \text{DT} + 0,271318 \text{DBC V}$	0,46	0,7437
Área foliar específica		
$\text{AFE A} = 226,8712 - 10,5169 \text{DT} + 0,1453 \text{DT}^2$	0,73	2,4458
$\text{AFEC} = 265,5349 - 12,8613 \text{DT} + 0,1803 \text{DT}^2$	0,61	3,6131
$\text{AFEB} = 290,7317 - 14,4021 \text{DT} + 0,2043 \text{DT}^2$	0,54	4,3883
$\text{AFET} = 266,1581 - 12,8950 \text{DT} + 0,1810 \text{DT}^2$	0,66	3,2419

(*) AFPA: Área foliar proyectada del ápice ($\text{m}^2 \text{árb}^{-1}$), AFPC: Área foliar proyectada del centro de la copa ($\text{m}^2 \text{árb}^{-1}$), AFPA: Área foliar proyectada de la base de la copa ($\text{m}^2 \text{árb}^{-1}$), AFPA: Área foliar proyectada total ($\text{m}^2 \text{árb}^{-1}$), IAFA: Índice de área foliar del ápice ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), IAFC: Índice de área foliar del centro de la copa ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), IAFB: Índice de área foliar de la base de la copa ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), IAFT: Índice de área foliar total ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), AFEA: Área foliar específica del ápice ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), AFEC: Área foliar específica del centro de la copa ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), AFEB: Área foliar específica de la base de la copa ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), AFET: Área foliar específica total ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), DT: Diámetro de tocón (cm), DBCV: Diámetro en la base de la copa viva (cm), ln: logaritmo, R²: Coeficiente de determinación, EEE: Error estándar de estimación.

(**) Todos los coeficientes son significativos ($p < 0,05$), excepto los indicados como (†)

Los modelos alométricos obtenidos presentan residuos que varían de manera aleatoria alrededor de la línea base (Figura 4.2, 4.3 y 4.4).

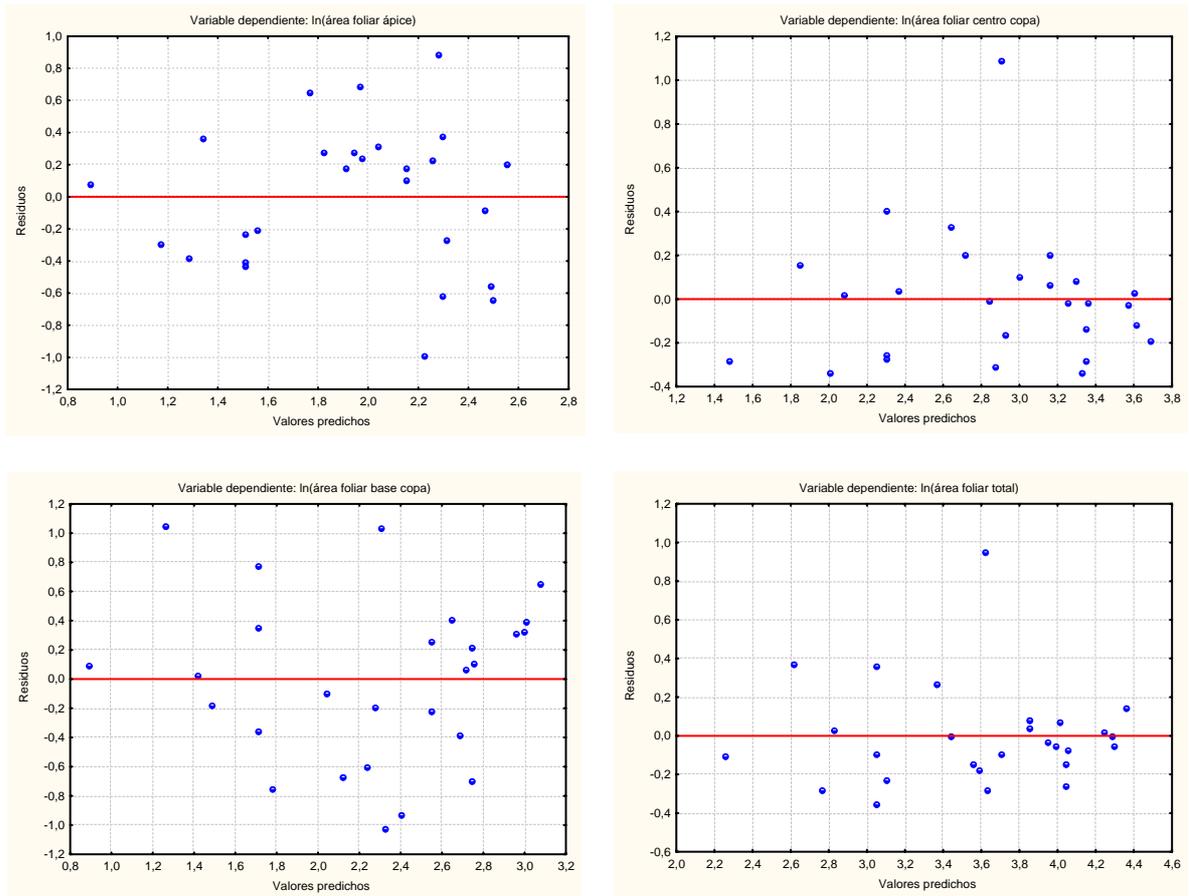


Figura 4.2. Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en el modelo de estimación alométrico de área foliar proyectada por árbol.

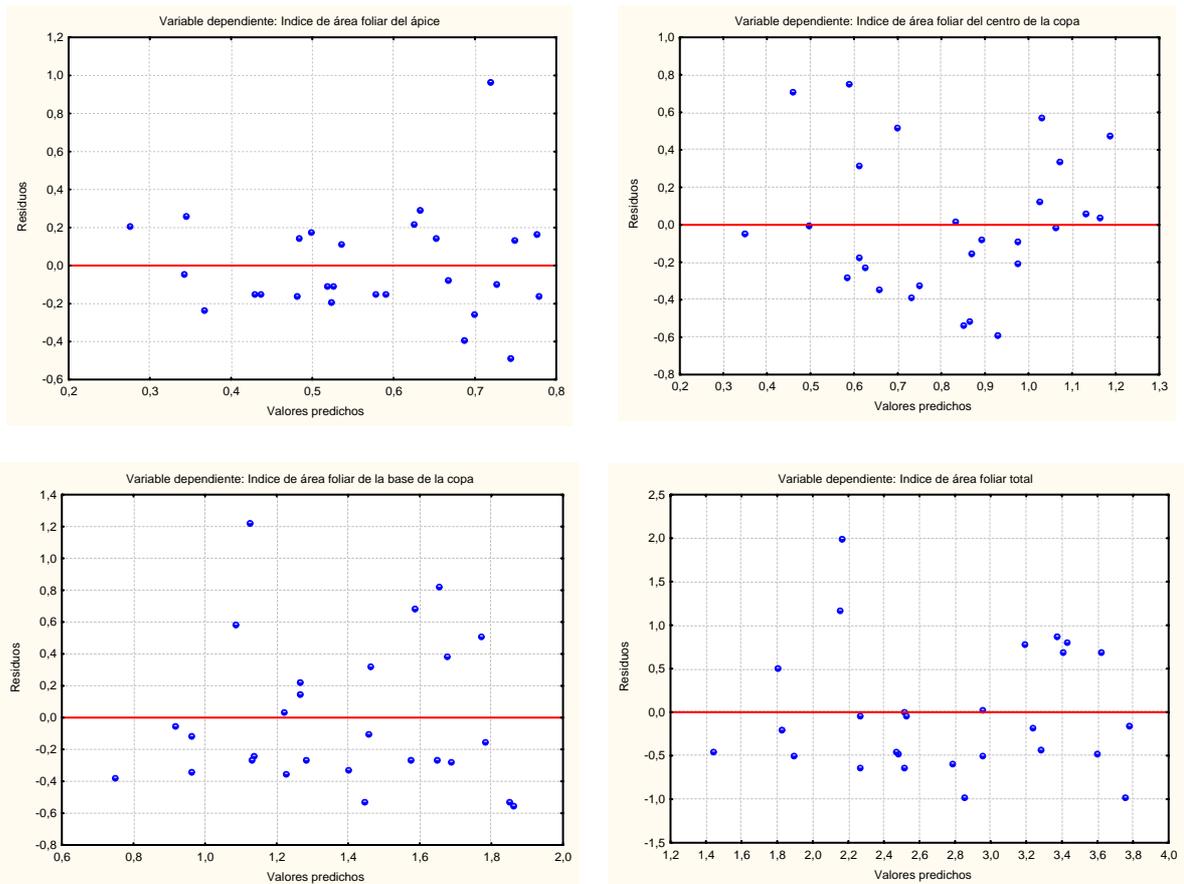


Figura 4.3: Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en el modelo alométrico que estima el índice de área foliar (IAF).

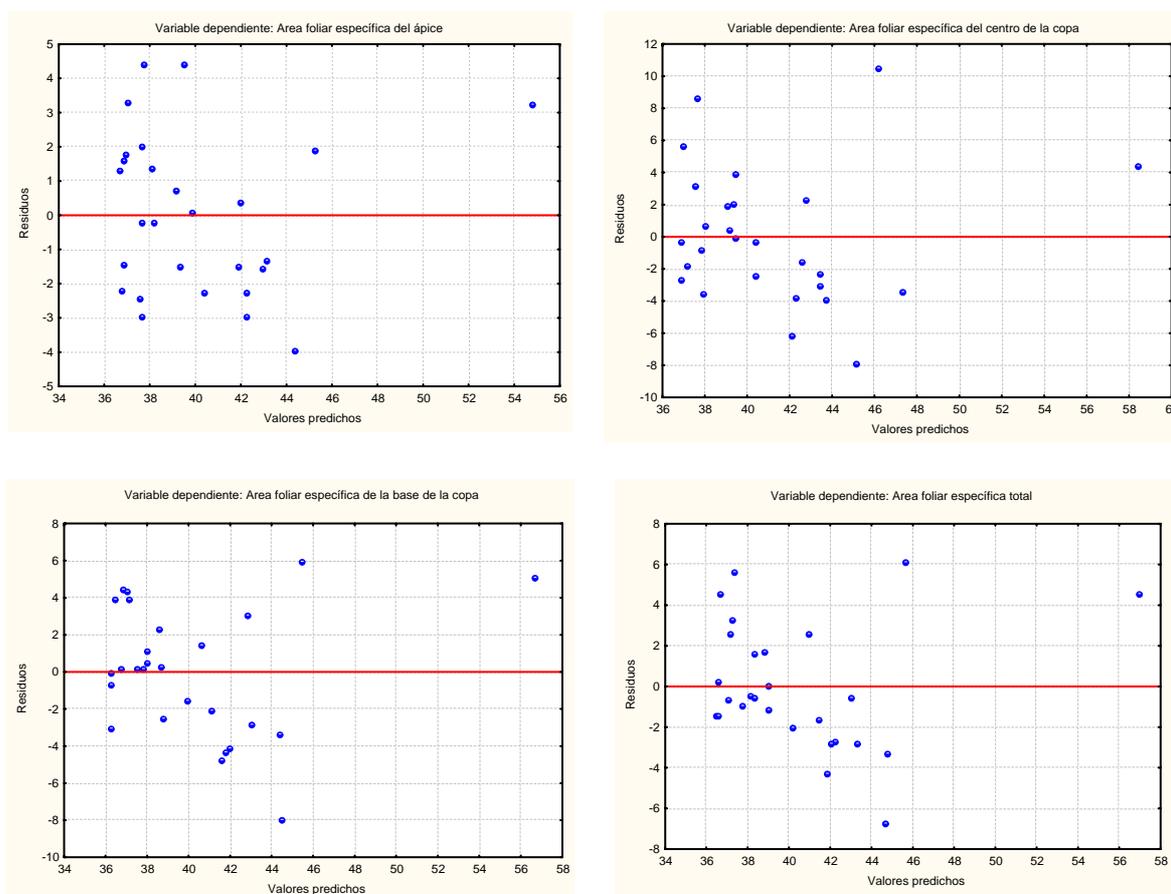


Figura 4.4: Gráfico de residuos para las variables dependientes incluidas en el modelo alométrico que estima el área foliar específica (AFE).

4.5. DISCUSIÓN

4.5.1. ÁREA FOLIAR PROYECTADA

El AFP total alcanzó un máximo en el tratamiento T4 con $50,1 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$, siendo la diferencia significativa con el valor del tratamiento T0 ($14,6 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$) (menor valor) (Tabla 4.1). El menor AFP encontrado en los tratamientos de mayor densidad ($1.100 \text{ arb ha}^{-1}$) se explica porque presentan copas más reducidas. Los valores de AFP se comparan con los obtenidos por Rodríguez (2002), quién determinó un total de $24,6 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$ en un rodal con régimen forestal de *Pinus radiata* y a los observados por Gajardo (2005) en rodales de *Nothofagus dombeyi* sin raleo ($16,3 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$) y con dos raleos ($87,3 \text{ m}^2 \text{ arb}^{-1}$). La

distribución del AFP entre las secciones de la copa del árbol es, en todos los tratamientos, proporcionalmente mayor en la sección central (Tabla 4.1). La localización de una mayor proporción de área foliar en la sección central de la copa ha sido observada por Rodríguez (2002) en rodales raleados de *Pinus radiata*, por Medhurst y Beadle (2001) en rodales raleados y no raleados de *E. nitens* y por Gajardo (2005) en rodales con dos raleos de *Nothofagus dombeyi*.

El raleo tuvo efecto sobre el AFP, tanto total ($p < 0,0001$) como por sección de copa (Tabla 4.2). Al comparar el AFP total de los árboles raleados a diferentes intensidades, se aprecia que el AFP total aumenta de manera significativa a medida que disminuye la densidad. Es decir, los resultados encontrados en este estudio, indican que la intensidad del raleo afectó significativamente el área foliar (Tabla 4.2). Esto también ha sido observado en otras especies. En *Pseudotsuga menziesii* se observó un incremento del follaje en árboles individuales como respuesta al raleo (Barclay *et al.*, 1986). En *Nothofagus dombeyi* se determinó para diferentes densidades residuales que la oportunidad e intensidad del raleo afectó el área foliar (Gajardo, 2005). En *Pinus radiata* se observó variaciones de la cantidad de follaje en rodales con diferente régimen silvícola (Rodríguez, 2002). Ello, pudiera ser atribuible a una mayor luminosidad disponible para el árbol, provocando un aumento de follaje especialmente en la base de la copa, que permite que las ramas basales continúen creciendo (Medhurst y Beadle, 2001). Al contrario de lo observado en el raleo, la poda no tuvo efecto sobre el IAF total ($p = 0,3590$) (Tabla 4.2). Esto se explicaría por la tardía intervención de poda, que se practicó cuando la plantación tenía 6 años de edad, podando ramas basales secas o en vías de secarse y por lo tanto, sin efecto de importancia sobre la superficie foliar. A pesar de esto, se observa interacción raleo-poda de significancia para las variables AFP total ($p = 0,0226$) y AFP de la sección de la base de la copa ($p = 0,0279$) (Tabla 4.2). Esto indica que si bien la poda individualmente no tiene efecto, si lo tiene de manera combinada con el raleo en la sección de la base de la copa. La eliminación de ramas basales deficitarias en aporte de fotosintatos, combinados con raleos que permiten aumentar la luminosidad, hace posible el incremento de la superficie foliar, especialmente en la base de la copa viva.

4.5.2. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

El IAF total alcanzó un máximo en el tratamiento T4 con $3,84 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, siendo la diferencia significativa con el valor del tratamiento T0 ($1,63 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) (menor valor). El resto de los tratamientos no presentan diferencias significativas entre ellos (Tabla 4.3). Los valores del IAF se encuentran dentro de los rangos señalados por otros autores. En rodales de *E. nitens* raleados a densidad residual de 600 arb ha^{-1} , presentaron IAF de $2,23 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y $2,78 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ luego de 6 y 18 meses del raleo (Medhurst y Beadle, 2001). En *Pinus contorta*, encontraron IAF de $2,29 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ el cual aumenta a $2,72 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ con fertilizaciones anuales (Amponsah *et al.*, 2005). En sitios de buena calidad ($30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), Beadle *et al.* (1995) señalan que el IAF para *Eucalyptus* es entre $4,5$ y $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, en cambio, en sitios pobres es menor a $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Cherry *et al.*, 1998). En plantaciones de *E. nitens* con fertilizante, el IAF varía entre $1,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (baja fertilización) y $9,6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (alta fertilización) (Smethurst *et al.*, 2003). De acuerdo a lo anterior y a los resultados obtenidos, el sitio en el cual se ubica el ensayo presentaría condiciones medias de crecimiento. Sin embargo, esto se contrapone con los resultados de mediciones de volumen practicado a los rodales, que indican al sitio del ensayo como de alto rendimiento ($48,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, Muñoz *et al.*, 2005).

El raleo afectó el IAF total ($p=0,0046$) (Tabla 4.4). Al comparar los tratamientos raleados (800 y 400 arb ha^{-1}) con los tratamientos no raleados ($1.100 \text{ arb ha}^{-1}$), se aprecia que los tratamientos raleados presentan mayor IAF. Similar tendencia ha sido observada para otras especies como respuesta al raleo. En *Pinus taeda* el raleo incrementó la biomasa foliar (Guillespie *et al.*, 1994), en *Pseudotsuga menziesii* se observó un incremento del follaje en árboles individuales como respuesta al raleo (Barclay *et al.*, 1986). La respuesta al raleo pudiera ser atribuible a una mayor luminosidad disponible por árbol, que provoca un incremento del tamaño de la copa, como también la modificación del estatus hídrico y nutricional del suelo. Al respecto, Barclay *et al.* (1986), señalan que el desarrollo de follaje depende principalmente de la penetración de luz y de la disponibilidad de nutrientes y agua, lo cual explicaría la mayor superficie foliar de los árboles presentes en tratamientos raleados.

La poda no tuvo efecto sobre el IAF total ($p=0,622$). Esto es contradictorio, porque se reconoce que la intervención de poda, especialmente cuando se cortan ramas verdes, afecta el área foliar. El IAF de una plantación de *E. nitens*, se redujo desde 6,3 a 3,5 $m^2 m^{-2}$ al podar el 50% de la copa viva, aunque aumenta a 5,5 $m^2 m^{-2}$ luego de 13 meses de practicada la poda (Pinkard *et al.*, 1999). Al podar 70% de la copa viva, el IAF se reduce a 1,9 $m^2 m^{-2}$. *E. nitens*, al igual como muchas otras especies, compensa la pérdida de follaje cambiando su patrón de localización de los recursos en favor del desarrollo de área foliar. La magnitud y duración de los cambios se incrementa con la severidad de poda (Pinkard y Beadle, 1998c). En el ensayo, la poda no tuvo efecto sobre el IAF. Esto se explicaría por la tardía intervención de poda, se practicó cuando la plantación tenía 6 años de edad, podando ramas basales secas o en vías de secarse y por lo tanto, sin efecto de importancia sobre la superficie foliar. Mohammed *et al.* (2000) sugiere que la poda de ramas verdes en *E. nitens* se realice tempranamente, antes del cierre de copas (2,5 años de edad), especialmente en sitios de alta productividad.

La distribución del IAF entre las secciones de la copa del árbol es, en todos los tratamientos, proporcionalmente mayor en la sección central, presentando sólo diferencia significativa entre los tratamientos T0 y T5 (Tabla 4.3 y Figura 4.1). La localización de una mayor proporción de follaje en la parte central de la copa ha sido reportado por Rodríguez (2002) en rodales raleados de *Pinus radiata*, por Medhurst y Beadle (2001) en rodales raleados y no raleados de *E. nitens* y por Gajardo (2005) en rodales con dos raleos de *Nothofagus dombeyi*.

El raleo tiene efecto significativo en la variación del IAF total entre los tratamientos de densidad 1.100 y 800 arb ha^{-1} , como también en la variación del IAF localizado en la sección ápice ($p=0,005$) y centro ($p=0,0012$) (Tabla 4.4). Esto estaría señalando que árboles remanentes de raleo responden a la mayor luminosidad generando mayor superficie foliar (Figura 4.1). Esto no es claro para la densidad de rodal 400 arb ha^{-1} , debido a que aún no se cierra totalmente su dosel.

En plantaciones de *Eucalyptus*, el IAF se incrementa con el desarrollo del rodal hasta que se estabiliza o declina levemente (Battaglia *et al.*, 1998). En este estudio, el IAF se

incrementa desde la densidad 400 a 800 arb ha⁻¹, para luego decrecer levemente. El análisis teórico señala que el equilibrio del IAF se alcanzaría a cierto nivel de luminosidad y tasa de respiración del follaje, nivel que no se ha alcanzado en los árboles de densidad 400 arb ha⁻¹ debido a que aún no logran la cobertura total del dosel.

4.5.3. ÁREA FOLIAR ESPECÍFICA

El AFE total alcanzó un máximo de 46,0 cm² g⁻¹ (4,60 m² kg⁻¹) en el tratamiento T0 y un mínimo de 36,6 cm² g⁻¹ (3,66 m² kg⁻¹), aunque sin diferencia significativa entre tratamientos (Tabla 4.3). Los valores de AFE se encuentran dentro de los rangos señalados por otros autores. En *E. nitens*, en plantas de pocas semanas, el AFE varía aproximadamente entre 4 y 5 m² kg⁻¹ (Close y Beadle, 2004) y a los 7 años, es de 4,75 y 4,93 m² kg⁻¹ para densidad de 500 y 1.667 arb ha⁻¹, respectivamente (Pinkard y Neilsen, 2003). Esto indicaría que en *E. nitens* el AFE no cambia de manera importante al variar la edad y densidad de rodal.

A pesar de lo anterior, se observa que el mayor valor medio de AFE corresponde a los tratamientos de densidad 1.100 arb ha⁻¹ (4,32 m² kg⁻¹) (Tabla 4.4 y Figura 4.1)), aunque la diferencia no es significativa con las otras densidades. Esto señala que árboles sometidos a condiciones de menor luminosidad tienen mayor área foliar por unidad de peso seco de hojas o una mayor proporción de hojas de sombra (Meadows y Hodges, 2002). La mayor AFE encontrada en los tratamientos de mayor densidad (1.100 arb ha⁻¹) se explica por su copa reducida (IAF de 2,10 m² m⁻², Tabla 4.4) y a la estrategia que desarrolla los árboles para captar mayor cantidad de luz a través de hojas comparativamente más grandes.

La mayor proporción de AFE se localiza en el tercio basal de la copa (Tabla 4.4 y Figura 4.1). Esto se explica porque el raleo aumenta la capacidad fotosintética de la copa, principalmente en su parte baja, debido a la mejora en las condiciones de luz (Medhurst y Beadle, 2000). Rodríguez (2002) señala que el AFE es afectado por el régimen silvícola y la posición de la copa. Sólo hay diferencia significativa entre los tercios apicales de los árboles al comparar el nivel de densidad 400 con 1.100 arb ha⁻¹ (Tabla 4.4). Esto es concordante con lo señalado anteriormente, en cuanto a que árboles de copa reducida optan

por generar hojas más grandes que les permita captar más luz.

El incremento del AFE al disminuir la luz disponible coincide con lo señalado por varios autores. En *Picea abies* (Eckmüllner y Sterba, 2000), *Pseudotsuga menziessii*, *Pinus ponderosa* y *Pinus monticola* (Borghetti *et al.*, 1986; Bartelink, 1996; Monserud y Marshall, 1999), *Quercus falcata* y *Fraxinus pennsylvanica* (Meadows y Hodges, 2002). En todos estos trabajos, coincidentemente con este estudio, la tendencia es que el follaje más sombreado tenga mayor AFE, lo que se explicaría por la necesidad de incrementar la superficie capaz de capturar la luminosidad difusa de sectores sombríos, involucrando a su vez, un costo mínimo de respiración (Gajardo, 2005).

La ausencia de significancia estadística en los resultados de AFE señala la presencia de alta variabilidad en los datos, lo cual es consistente con otros estudios (Beets y Lane, 1987; Gajardo, 2005). La variabilidad se relaciona con la alta plasticidad de la morfología de la copa (Mori y Takeda, 2004) y con la capacidad de los árboles de compatibilizar la maximización de la ganancia en carbono con la disponibilidad temporal y de largo plazo en el uso y eficiencia de los recursos del sitio (Landsberg y Gower, 1997).

4.5.4. FUNCIONES ALOMÉTRICAS

La variable que mejor estimó el AFP es el diámetro en la base de la copa viva, en su expresión logarítmica. La relación presenta buenos coeficientes de determinación, fluctúa entre 0,50 y 0,82, para la estimación del área foliar del ápice y total, respectivamente. Se reconoce que el diámetro de la base de la copa viva es un buen estimador del área foliar (Gajardo, 2005). Al respecto, este estudio sugiere que la relación entre el diámetro de la base de la copa viva es también un buen predictor del área foliar proyectada del árbol.

Las variables que mejor estimaron el IAF son el diámetro tocón y diámetro base copa viva, pero la relación establecida presenta coeficientes de determinación bajos, especialmente al estimar el IAF de las diferentes secciones de la copa (el coeficiente de determinación varía entre el 0,21 y 0,32) (Tabla 4.5). El IAF presenta buena correlación con variables que expresan el tamaño del árbol, como lo señalan Rodríguez (2002) en *Pinus radiata*, Cherry

et al. (1998) y Pinkard y Nielsen (2003) en *E. nitens*. También, en diversos estudios se ha determinado que la mayor capacidad predictora del área foliar, está dada por las variables área de albura en el dap o en la base de la copa viva, siendo superior una u otra, de acuerdo con la especie, sitio, tasa de crecimiento y densidad (Kaufman y Troendle, 1981; Borghetti *et al.*, 1986; Espinosa *et al.*, 1987; Coyea y Margolis, 1992; Mencuccini y Grace, 1994; Monserud y Marsall, 1999; todos citados por Gajardo, 2005).

En este estudio la baja correlación estaría dada por la alta variabilidad que presentó el IAF. El análisis teórico señala que el equilibrio del IAF está dado por un determinado nivel de luminosidad y tasa de respiración del follaje, nivel no alcanzado en los árboles de densidad 400 arb ha⁻¹ debido a que aún no logran la cobertura total del dosel. Se realizó un ajuste, con el mismo modelo, pero solamente con los datos (n=18) correspondientes a los tratamientos con dosel cerrado (densidades 1.100 y 800 arb ha⁻¹). Se determinó que para el IAF total, el R² aumentó de 0,46 a 0,80 (aumento de 74%) y el error disminuyó de 0,744 a 0,507 (disminución del 32%).

La variable que mejor estimó el AFE fue el diámetro tocón incluida en un modelo lineal cuadrático, de la forma $y = a + bx + cx^2$. Se obtuvieron coeficientes de determinación (R²) de 0,73, 0,61, 0,54 y 0,66 para los modelos que estiman el AFE de la sección ápice, centro, base y total de la copa (Tabla 4.5). Todos los modelos presentaron coeficientes regresionales significativos ($p < 0,05$).

El análisis de residuos de los modelos que estiman el AFP, IAF y AFE, determinó que éstos fluctúan de manera aleatoria alrededor de la línea base (Figura 4.2, 4.3 y 4.4). Señalando con ello que los errores tienen varianza constante y que los residuos son independientes del valor de la variable predictora.

4.6. CONCLUSIONES

El índice de área foliar es mayor en los tratamientos de densidad 800 arb ha⁻¹ y menor en los tratamientos de densidad 1.100 arb ha⁻¹. En cuanto al área foliar específica, es mayor en

los tratamientos de densidad 1.100 arb ha⁻¹ (espaciamiento más reducido). La poda no tuvo efecto sobre el índice de área foliar como tampoco sobre el área foliar específica, resultado que puede deberse a la tardía oportunidad de intervención. El índice de área foliar se concentra en la sección central de la copa y el área foliar específica en la sección basal de la copa.

DISCUSIÓN GENERAL

CAPÍTULO 5

5. CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN GENERAL

La innovación en silvicultura intensiva de plantaciones está muy relacionada con el estudio de la respuesta de los árboles a las intervenciones silvícolas, permitiendo con ello, evaluar su aplicabilidad a nivel operacional. En esta tesis doctoral se ha estudiado las intervenciones de poda y raleo, combinados en 9 diferentes esquemas de manejo silvícola, que cubren objetivos desde la producción pulpable a la producción de madera para chapas, proporcionando información que permite determinar la rentabilidad de cada esquema por parte de propietarios interesados en aplicarlos.

De entre las intervenciones silvícolas analizadas, el raleo tuvo efecto significativo en un conjunto de variables que explican el crecimiento y forma de los árboles. En efecto, el raleo afectó la respuesta de las variables dap, altura total, largo de copa verde, coeficiente de esbeltez y volumen. El dap medio por árbol de los tratamientos de baja densidad es significativamente más grande que el dap medio de los tratamientos de mayor densidad. A medida que aumenta la edad del rodal, es más evidente la diferencia de diámetros entre las distintas densidades, apreciándose en la distribución diamétrica de los árboles un desplazamiento generalizado hacia clases de diámetro mayores. También el raleo afectó la altura total de los árboles, siendo mayor en los tratamientos de menor densidad residual. El mayor crecimiento que presenta los árboles de los tratamientos de baja densidad tiene relación con el mayor tamaño de su copa. Efectivamente, los árboles de tratamientos de baja densidad poseen largo de copa verde mayor que los árboles de tratamientos de alta densidad. Los resultados del efecto del raleo en las variables de crecimiento que han sido evaluados por este estudio coinciden con los obtenidos por Muñoz y Espinosa (1999), Nielsen y Gerrand (1999) y Medhurst y Beadle (2000), en estudios con *E. nitens*, por Maclaren (1993) y Espinosa *et al.* (1994) en *Pinus radiata*, y Smith *et al.* (1997) en *Pinus taeda*.

En general, los árboles de los tratamientos de baja densidad son de mayor tamaño, aunque este resultado se debe tomarse con precaución debido a que se ha encontrado que el coeficiente de esbeltez de los árboles es mayor a 1 m cm^{-1} . Se reconoce que los árboles

residuales de un raleo son particularmente vulnerables a daño por viento, estimándose que un coeficiente de esbeltez menor a 1 m cm^{-1} es adecuado en muchas especies para minimizar el riesgo de daño por viento (Smith *et al.*, 1997). Estudios desarrollados en Tasmania (Australia) con *E. nitens* entregan valores de coeficiente de esbeltez menor a 1 m cm^{-1} (Pinkard y Neilsen, 2003), para densidad de rodal similar a la más baja densidad empleada en este estudio. De acuerdo a esto, los esquemas de manejo que han sido estudiados producen árboles que presentan una alta susceptibilidad al daño por viento, debido a que en todos los tratamientos los árboles tienen un coeficiente de esbeltez mayor a 1 m cm^{-1} .

El alto valor del coeficiente esbeltez limita la aplicabilidad de los esquemas de manejo en zonas expuestas a fuertes viento. En este sentido, la ejecución de poda contribuye a disminuir este efecto, porque al reducir la copa de los árboles se reduce también su resistencia a la acción del viento (Cendoya y Muñoz, 2002). Además, la poda contribuye a cambiar la relación altura / dap en lo árboles. En efecto, de entre los tratamientos de densidad 400 arb ha^{-1} (que tienen los menores coeficientes), el rodal podado a 7 m presenta el coeficiente de esbeltez más bajo.

Lo que finalmente interesa al productor forestal es conocer la cantidad de volumen que es capaz de obtener con un determinado esquema de manejo. Al respecto, el esquema de manejo pulpable (densidad $1.100 \text{ arb ha}^{-1}$) presenta el mayor volumen por unidad de superficie. En promedio el volumen es de $634 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, lo cual es alto si se considera que se obtienen desde rodales jóvenes (14 años de edad). En el caso del esquema para producir madera aserrable y/o chapas (densidad 400 arb ha^{-1}) el volumen promedio es de $399 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. En este caso, no sólo interesa conocer el volumen por unidad de superficie, sino que además, el ahusamiento de la troza basal por la importancia que tiene en su aprovechamiento. La troza basal es la parte del fuste que acumula la mayor proporción del volumen del árbol. Para estimar el ahusamiento se ha utilizado el factor de Forma Girard. Este indicador es mayor en los árboles presentes en los tratamientos de menor densidad y por lo tanto, las trozas basales obtenidas desde esos rodales tendrán un aprovechamiento mayor. Los valores obtenidos en este estudio son un poco menores a los medidos por

Larsen (1999) en *Pinus echinata* y *Quercus alba*, pero mayores a los determinados por Peters *et al.* (1985) en *Pinus radiata*.

También interesa al productor forestal conocer la edad de rotación de los rodales sometidos a diferentes esquemas de manejo. La edad de rotación biológica es de 14 años para los tratamientos con esquema de manejo pulpable. En cambio, para madera de mayores dimensiones, como la que se utiliza para aserrío y/o chapas, se estima que la edad de rotación biológica será alrededor de los 18 años. El Instituto Forestal de Chile sugiere considerar rotaciones entre 8 - 12 años para esquemas pulpables (Infor, 2004) y 14 - 22 años para esquema aserrable y/o chapas (Infor, 2004b), variando la edad de rotación final según sea la calidad de sitio y manejo silvícola. La edad de rotación biológica de los tratamientos con esquema de manejo pulpable, determinada en este estudio, es mayor a la sugerida por el Instituto Forestal de Chile y a la utilizada por la mayoría de las empresas forestales chilenas. Al respecto, la empresa Bosques Arauco (Chile) utiliza en su esquema pulpable densidad inicial de plantación de 1.600 arb ha⁻¹ para obtener un volumen que fluctúa entre 300 a 350 m³ ha⁻¹ a la edad de cosecha (12 años). Por lo tanto, es probable que con densidades más altas (cercana a 1.600 arb ha⁻¹), la edad de rotación biológica establecida en este estudio disminuya, ubicándolo en el rango de 8 a 12 años, tal como lo señala Infor (2004).

La otra intervención silvícola practicada en los rodales bajo estudio fue poda. En este caso, la poda no tuvo efecto significativo en el conjunto de variables que explican el crecimiento y forma de los árboles. Se reconoce que el efecto de la poda está relacionado fundamentalmente con la oportunidad e intensidad de su aplicación (Barret, 1968; Sutton, 1985; Maclaren, 1993). Por otra parte, diferentes estudios en *E. nitens* señalan que podar hasta el 50% de la copa verde no afecta el incremento en diámetro y altura (Pinkard *et al.*, 1995; Pinkard y Beadle, 1998b; Celhay *et al.*, 1999; Nielsen y Pinkard, 2000), como tampoco el ahusamiento (Pinkard y Beadle, 1998b). En este estudio, la poda se practicó cuando la plantación tenía 6 años de edad, en plena fase de competencia intraespecífica, con ramas basales secas o en vías de secarse. Por lo tanto, la ausencia de efecto de la poda sobre las variables de crecimiento y forma de los árboles, se puede deber a la escasa proporción de ramas verdes eliminadas al momento de establecer el ensayo.

La ejecución de intervenciones de poda y raleo tienen también efecto sobre la distribución de la biomasa en los árboles. En efecto, el raleo afectó la biomasa total por árbol, aumentando a medida que disminuye la densidad. Estos resultados son concordantes con los obtenidos por Bernardo *et al.* (1998) y Pinkard y Nielsen (2003). Al analizar el incremento medio anual de biomasa total de los tratamientos con esquema de manejo pulpable y compararlo con los tratamientos con esquema de manejo para producir madera aserrable y/o chapas (trozas gruesas), se determinó que éste último esquema presenta un incremento que es sólo un 20,2% inferior al esquema pulpable a pesar que tiene tres veces menos árboles. Hay que tener presente que los árboles de los tratamientos con esquema de manejo para producir trozas gruesas, aún no han alcanzado la cobertura total del sitio y por lo tanto, es de esperar que cuando esto se logre, la diferencia en el incremento medio anual de biomasa entre ambos esquemas de manejo sea mínima. Esto es coincidentemente con lo indicado por Pinkard y Nielsen (2003) quienes determinaron, trabajando con *E. nitens*, incrementos medios anuales de biomasa similar para distintas densidades de rodal.

Un aspecto a destacar es la notable diferencia en la producción de biomasa por parte de *E. nitens* con respecto a otras especies forestales. El incremento medio anual de biomasa obtenido en este estudio es dos veces mayor que el incremento con *Pinus radiata* (Rodríguez, 2002), cinco veces la producción con *Pseudotsuga menziesii* (Espinosa y Perry, 1987) y tres veces con *Nothofagus dombeyi* (Grandon, 2004).

En todos los tratamientos estudiados la biomasa se concentró en el fuste, aunque la proporción es mayor en los tratamientos con esquema pulpable. Es decir, a mayor densidad de rodal, mayor es la proporción de biomasa que se concentra en el fuste y por lo tanto, menor la biomasa presente en la copa. Resultados similares han sido obtenidos en *Eucalyptus* por Monteiro y Pereira (1990), citados por Donoso (1999). Que los tratamientos de baja densidad presenten la menor proporción de biomasa en el fuste, se explica por la reasignación de recursos que deben realizar los árboles para incrementar, sostener y mantener su copa, utilizando de esta manera los recursos liberados por el raleo (Barclay *et al.*, 1986; Smith *et al.*, 1997).

Como se ha dicho antes, esto tiene relación con el tamaño de la copa. En efecto, el largo de copa verde es mayor en los tratamientos con densidades bajas, señalando con ello la mayor biomasa de la copa de los árboles (ramas, ramilla y hojas). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Pinkard y Nielsen (2003) en plantaciones de *E. nitens*. Análogamente, los árboles de tratamientos de baja densidad poseen mayor proporción de biomasa de copa en el tercio central, generándose en estos árboles copas más globosas. Llama la atención la baja participación de la biomasa de copa en la biomasa total del árbol (aproximadamente un 5%), lo cual es evidente si se compara con otras especies. En rodales raleados de *Nothofagus dombeyi*, la biomasa de la copa representa un 20% (Grandon, 2004) y en *Pinus radiata* un 31% (Rodríguez, 2002). Estos resultados indican que *E. nitens* es capaz de generar altos niveles de biomasa con una pequeña proporción de copa.

Con respecto a la poda, ésta no tuvo efecto significativo en la cantidad y distribución de biomasa de los componentes aéreos de los tratamientos, aunque este resultado puede deberse a las condiciones de establecimiento del ensayo ya mencionadas anteriormente. Se esperaba que la poda influyera en los cambios de la morfología de las hojas, arquitectura de la copa y distribución del follaje de acuerdo a lo indicado por Pinkard (1977) citado por Pinkard *et al.* (1999).

En concordancia con lo obtenido para biomasa, el área foliar es máxima en los tratamientos de baja densidad. El área foliar proyectada (expresada en $\text{m}^2 \text{arb}^{-1}$) de los tratamientos con esquema de manejo aserrable y/o chapas es 3 veces mayor que el área foliar proyectada del esquema pulpable. La mayor superficie foliar de los árboles presentes en los tratamientos raleados se debe a que el desarrollo del follaje depende principalmente de la penetración de luz y de la disponibilidad de nutrientes y agua (Barclay *et al.*, 1986). Similar tendencia ha sido observada para otras especies como respuesta al raleo. En *Pinus taeda* el raleo incrementó la biomasa foliar (Guillemie *et al.*, 1994) al igual que en *Pseudotsuga menziesii* (Barclay *et al.*, 1986). Por otra parte, el índice de área foliar (expresado en $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) es también afectado por el raleo. En efecto, los tratamientos raleados presentan mayor índice de área foliar que los tratamientos no raleados. Es importante destacar que el índice de área foliar se incrementa desde la densidad 400 a 800 arb ha^{-1} , para luego decrecer levemente. El análisis teórico señala que el equilibrio del índice de

área foliar se alcanzaría a cierto nivel de luminosidad y tasa de respiración del follaje, nivel que aún no alcanzan los árboles de densidad 400 arb ha⁻¹ debido a que la cobertura de dosel no es completa. Se reconoce que en plantaciones de *Eucalyptus*, el índice de área foliar se incrementa con el desarrollo del rodal hasta que se estabiliza o declina levemente (Battaglia *et al.*, 1998).

Aunque los árboles de los tratamientos de mayor densidad residual presentan la menor superficie foliar proyectada, éstos alcanzan la mayor área foliar específica (expresada en m² kg⁻¹). Esto indica que árboles sometidos a condiciones de menor luminosidad tienen mayor área foliar por unidad de peso seco de hojas o una mayor proporción de hojas de sombra (Meadows y Hodges, 2002). La mayor área foliar específica encontrada en los tratamientos de mayor densidad se explica por su reducida copa y a la capacidad de los árboles para captar más luz a través de hojas comparativamente más grandes. El incremento del área foliar específica al disminuir la luz disponible, coincide con lo señalado por varios autores para diferentes especies como, *Picea abies* (Eckmüllner y Sterba, 2000), *Pseudotsuga menziessii*, *Pinus ponderosa* y *Pinus monticola* (Borghetti *et al.*, 1986; Bartelink, 1996; Monserud y Marshall, 1999), *Quercus falcata* y *Fraxinus pennsylvanica* (Meadows y Hodges, 2002). En todos estos trabajos, coincidentemente con este estudio, la tendencia es que el follaje más sombreado tenga mayor área foliar específica, lo que se explicaría por la necesidad de incrementar la superficie capaz de capturar la luminosidad difusa de sectores sombríos, involucrando a su vez, un costo mínimo de respiración (Gajardo, 2005).

De similar manera a lo observado en la distribución de la biomasa aérea, la distribución del índice de área foliar es en todos los tratamientos proporcionalmente mayor en la sección central. Esto es concordante con lo reportado por Rodríguez (2002) en rodales raleados de *Pinus radiata*, por Medhurst y Beadle (2001) en rodales raleados y no raleados de *E. nitens* y por Gajardo (2005) en rodales de *Nothofagus dombeyi* con dos raleos. En cambio, el área foliar específica no tiene el mismo comportamiento. En los tratamientos de menor densidad, el área foliar específica es levemente mayor en el tercio basal de la copa. En los tratamientos de mayor densidad, el área foliar específica es similar en todos los tercios. Esto es concordante con lo señalado anteriormente, en cuanto a que árboles de copa

reducida (tratamientos de mayor densidad) optan por generar hojas más grandes que les permita captar más luz.

La poda no tuvo efecto sobre el índice de área foliar, como tampoco sobre el área foliar específica. Esto es contradictorio, porque se reconoce que la intervención de poda, especialmente cuando se cortan ramas verdes, afecta el área foliar (Pinkard *et al.*, 1999). *E. nitens*, al igual como muchas otras especies, compensa la pérdida de follaje cambiando su patrón de localización de los recursos en favor del desarrollo de área foliar. La magnitud y duración de los cambios se incrementa con la severidad de poda (Pinkard y Beadle, 1998c). La ausencia de efecto de poda sobre el índice de área foliar y sobre el área foliar específica, se debe a lo tardío de su aplicación. La poda fue practicada cuando la plantación tenía 6 años de edad, podando ramas basales secas o en vías de secarse y por lo tanto, sin efecto de importancia sobre la superficie foliar. Esto coincide con lo señalado por Mohammed *et al.* (2000), quienes además sugieren que la poda de ramas verdes en *E. nitens* se realice tempranamente, antes del cierre de copas (2,5 años de edad), especialmente en sitios de alta productividad, como es el caso del sitio de este estudio.

El uso de funciones alométricas facilita la estimación de la cantidad de biomasa (Donoso, 1999; Landsberg y Gower, 1997) y el área foliar de un árbol (Norman y Campbell, 1989). En este estudio se utilizó un modelo de estimación único, para un amplio rango de tamaño de árbol, lo cual permitió obtener buenos ajustes entre los componentes de la biomasa aérea y tamaño de los árboles. Esto también ha sido reportado para diferentes especies, como *Pinus radiata* (Rodríguez, 2002), *Pseudotsuga menziesii* (Espinosa y Perry, 1987), *Nothofagus dombeyi* (Grandon, 2004), *E. globulus* (Donoso, 1999) y *E. nitens* (Pinkard y Nielsen, 2003).

La variable que mejor estimó el área foliar proyectada (expresada en $\text{m}^2 \text{arb}^{-1}$) es el diámetro en la base de la copa viva, en su expresión logarítmica. Por lo tanto, la relación entre el diámetro de la base de la copa viva es un buen predictor del área foliar proyectada del árbol (Gajardo, 2005). Por otra parte, las variables que mejor estimaron el índice de área foliar son el diámetro tocón y diámetro base copa viva, pero la relación establecida presenta coeficientes de determinación bajos, especialmente cuando se estima el índice de

área foliar de las diferentes secciones de la copa. Esto es contradictorio con lo determinado por Rodríguez (2002) en *Pinus radiata*, Cherry *et al.* (1998) y Pinkard y Nielsen (2003) en *E. nitens*. La baja correlación obtenida en este estudio se explica por la alta variabilidad que presentaron las variables a predecir. Sin embargo, al considerar sólo los datos de los tratamientos de densidad 1.100 y 800 arb ha⁻¹ (que presentan cobertura total de dosel), la correlación mejoró notoriamente, lográndose coeficientes de determinación similares a los obtenidos en otros estudios.

En términos generales, la localización del crecimiento en los árboles puede ser explicada por la teoría de prioridades. Esta teoría señala que en el árbol los fotosintatos son localizados jerárquicamente, teniendo el crecimiento fustal una prioridad inferior a otros procesos u órganos tales como respiración de mantención, crecimiento de hojas, raíces finas y tejido de reacción (Waring y Schlesinger, 1985; Perry, 1994; Oliver y Larson, 1996). Si se observa crecimiento en el fuste, es porque el árbol tuvo suficiente disponibilidad de fotosintatos una vez satisfechos sus requerimientos primarios (Gajardo, 2005).

Bajo esta teoría, el aumento de la competencia debiera generar una disminución de la proporción de fotosintatos localizados en los fustes. En tanto, la disminución del estrés por competencia (por causa del raleo), causaría un incremento general y por lo mismo, un incremento en la proporción de crecimiento asignado al fuste. Entonces, tomando como marco la teoría de prioridades, se sugiere que la localización del crecimiento fue afectada por el raleo. En efecto, la proporción de biomasa localizada en los componentes del fuste (leño) fue menor a medida que disminuyó la densidad residual de rodal. Es decir, a menos individuos por unidad de superficie, mayor es la proporción de peso seco que se concentra en el fuste. También la proporción de biomasa localizada en la copa fue mayor en árboles de tratamientos raleados (400 arb ha⁻¹). Esto es consecuencia del significativo crecimiento de ramas, permitiendo con ello, sostener y mantener las hojas y lograr así, utilizar los recursos liberados por el raleo (Barclay *et al.*, 1986; Smith *et al.*, 1997).

En el mismo sentido, los árboles de los tratamientos de mayor densidad concentran sus esfuerzos en la economía de sus recursos para su sobrevivencia. Estos árboles presentan

mayor área foliar específica y razón superficie foliar / biomasa de rama. Estos son mecanismos que emplean los árboles de rodales de densidad alta para incrementar fuertemente la superficie fotosintetizante de sus hojas, a un reducido costo de mantención, de manera similar a como lo harían árboles suprimidos (Gajardo, 2005).

La teoría de las prioridades también se aplica a las intervenciones silvícolas, como poda y raleo. Las intervenciones mencionadas generan cambios en la asignación de los fotosintatos en los árboles. La magnitud del cambio dependerá de la intensidad y duración de la intervención, disponibilidad y uso de los recursos por parte de los árboles. Para analizar la respuesta de los árboles se ha usado el índice de eficiencia de crecimiento, definido como el incremento medio anual (IMA) de madera fustal por unidad de área o biomasa foliar (Waring *et al.*, 1980; Waring y Schlesinger, 1985; Landsberg y Gower, 1997). Este índice integra la eficiencia fotosintética y la localización de fotosintatos del árbol (Vose y Allen, 1988) e indica el vigor general de un árbol (Waring *et al.*, 1980).

Los árboles de los tratamientos de mayor densidad ($1.100 \text{ arb ha}^{-1}$) presentan índice de eficiencia de crecimiento que es 104,4% mayor a los árboles de los tratamientos de menor densidad (400 arb ha^{-1}) (IMA a los 14 años y biomasa foliar a los 15 años) (Tabla 2.3 y 4.3). Esto sugiere que el mayor requerimiento de carbono que necesitan los tratamientos de menor densidad residual (400 arb ha^{-1}), es para la construcción y mantención de una copa de mayor tamaño, reduciendo de este modo la proporción de fotosintatos disponibles para el crecimiento fustal (Roberts, 1993; Vanninen y Mäkelä, 2000). Además, la razón superficie foliar / biomasa de rama fue mayor en los tratamientos de densidad $1.100 \text{ arb ha}^{-1}$. Es decir, las ramas de los árboles de tratamientos de densidad $1.100 \text{ arb ha}^{-1}$, sostienen más follaje por unidad de biomasa de ramas. Entonces, desde el punto de vista de la eficiencia de crecimiento, los árboles de los tratamientos no raleados ($1.100 \text{ arb ha}^{-1}$) son más eficientes al generar más madera con menos superficie foliar.

Es interesante señalar que la diferencia del índice de eficiencia de crecimiento entre las densidad 400 y 800 arb ha^{-1} es de 9,5% mayor en los tratamientos de densidad 800 arb ha^{-1} , señalando con ello, que los árboles presentes en ambos tratamientos, aún no alcanzan su

máximo crecimiento y por lo tanto, es posible esperar en el futuro mayores índices de eficiencia de crecimiento.

Coincidiendo con lo anterior y para las densidades 400 y 800 arb ha⁻¹, que son los tratamientos desde los cuales se puede obtener madera de mayores dimensiones, aún el IMA aún no supera al IPA y por lo tanto, se requiere esperar rotaciones más largas. Distinta es la situación de los tratamientos con 1.100 arb ha⁻¹ (esquema de manejo pulpable), donde el IMA supera o está próximo a superar al IPA, lo que implica que los tratamientos con esta densidad han alcanzado la culminación del incremento medio anual, logrando con ello la edad de rotación biológica del rodal (Daniel *et al.*, 1982).

CONCLUSIONES GENERALES

CAPÍTULO 6

6. CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo principal de la investigación expuesto en el punto 1.3. del Capítulo I de la presente tesis doctoral, era conocer la respuesta de los árboles de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden sometidos a tratamientos silviculturales de poda y raleo. Interesaba evaluar la respuesta de las variables de crecimiento (diámetro, altura, largo copa viva y volumen), variables de forma (coeficiente de esbeltez, factor de forma de Girard) y variables ecofisiológicas (distribución de biomasa aérea y área foliar), a los tratamientos silvícolas aplicados. Las principales conclusiones obtenidas en esta tesis son:

1. El análisis de la evidencia presentada señala que *E. nitens* es una especie que responde con facilidad a los tratamientos de raleo, modificando variables de crecimiento y forma del árbol. Los árboles de los tratamientos de baja densidad presentan el mayor dap medio por árbol, mayor altura total media, mayor largo de copa verde, mayor factor de forma de Girard y menor coeficiente de esbeltez. Estos árboles son de mayor tamaño, aunque este resultado se debe tomarse con precaución debido a que se ha encontrado que presentan una alta susceptibilidad al daño por viento.
2. La biomasa aérea total y por componente es afectada por el raleo, siendo mayor la biomasa en tratamientos con raleos más intensos. La mayor proporción de la biomasa total se concentra en el fuste de los árboles, aumentando la proporción con la densidad del tratamiento. La copa tiene una pequeña participación en la biomasa total, es decir, *E. nitens* es capaz de generar altos niveles de biomasa con una pequeña proporción de copa.
3. El área foliar proyectada es mayor en árboles de tratamientos raleados. Por el contrario, el área foliar específica, es mayor en árboles de tratamientos no raleados. El área foliar proyectada se concentra en la sección central de la copa y el área foliar específica en la sección basal de la copa.

4. La poda no tuvo efecto sobre el crecimiento y forma de los árboles, como tampoco sobre su biomasa aérea y área foliar, aunque este resultado se debe a la tardía oportunidad de intervención.
5. El mayor volumen por hectárea se alcanza en los tratamientos de 1.100 arb ha⁻¹ y 3,5 m de poda con 680,0 m³ ha⁻¹ y un incremento medio anual (IMA) de 48,6 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Los tratamientos más intensamente raleados (400 arb ha⁻¹) aún no han alcanzado el cierre de dosel y por lo tanto, es posible esperar en los próximos años un aumento de su producción volumétrica.
6. Se ha determinado que la edad de rotación biológica es de 14 años para los tratamientos sin raleo (esquema de manejo pulpable). En cambio, en los tratamientos más intensamente raleados (esquema de manejo para producir madera de mayores dimensiones), se estima que la edad de rotación biológica será alrededor de los 18 años.
7. Tomando como marco la teoría de prioridades, se sugiere que la localización del crecimiento fue afectada por el raleo. La proporción de biomasa localizada en la copa aumentó en árboles de tratamientos raleados, debido a la necesidad de incrementar, sostener y mantener las hojas y lograr así, utilizar los recursos liberados por el raleo
8. El índice de eficiencia de crecimiento es mayor en tratamientos sin raleo. Los árboles de tratamientos no raleados presentan un índice de eficiencia de crecimiento que es 104% mayor que los árboles de los tratamientos más intensamente raleados. Por lo tanto, los árboles de tratamientos no raleados son más eficientes en la producción de madera.
9. *E. nitens* posee condiciones que la convierten en una excelente especie para la producción de madera bajo diferentes esquemas de producción silvícola. Tiene plasticidad para adaptar su copa a diferentes condiciones de luminosidad, manteniendo su alta capacidad de producción de volumen.

10. Las variables medio ambientales que tienen relación con la capacidad de producir madera por parte de *E. nitens*, como cambios en el nivel nutritivo de los suelos y la disponibilidad de agua, no han sido suficientemente estudiadas en Chile. De allí, que estas variables debieran ser consideradas prioritarios en la realización de futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, A. 1994. Retoñación en cuatro especies del género *Eucalyptus* en Chile. En actas simposio: Los Eucaliptos en el desarrollo forestal de Chile. Pucón, Chile. pp: 227-240.
- Alberdi, M. and L. Corcuera. 1991. Cold acclimation in plants. *Phytochemistry*. Vol. 30 (10): 3177-3184.
- Álvarez, J. y E. Sandoval. 1999. Silvicultura integrada en Eucalipto. En actas simposio: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile. XII Silvotecnica, Concepción, Chile.
- Álvarez, E., C. Monterroso and M.L. Fernández Marcos. 2002. Aluminium fractionation in Galician (NW Spain) forest soils as related to vegetation and parent material. *Forest Ecology and Management* 166: 193-206.
- Amponsah, I., P. Comeau, R. Brockley and V. Lieffers. 2005. Effects of repeated fertilization on needle longevity, foliar nutrition, effective leaf area index, and growth characteristics of lodgepole pine in interior British Columbia, Canada. *Can. J. For. Res.* 35: 440-451.
- Aparicio, J. 2001. Rendimiento y Biomasa de *Eucalyptus nitens* con alternativas nutricionales para una silvicultura sustentable en un suelo rojo arcilloso. Tesis Magíster en Ciencias, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 234 p.
- Attiwill, P. and M. Adams. 1996. Nutrition of eucalypts. Collingwood, Vic. CSIRO, Australia. 440p.
- Avery, T. and H. Burkhart. 2002. Forest Measurements. Fifth edition. McGraw-Hill, New York, USA. 456 p.

- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 1993. Fisiología Vegetal. Editorial Interamericana McGraw-Hill. Madrid, España. 662p.
- Barclay, H.J., P.C. Pang and F.W. Pollard. 1986. Aboveground biomass distribution within trees and stand in thinned and fertilized Douglas-fir. Can. J. For. Res. Vol. 16: 438-442.
- Barret, J. 1968. Pruning of ponderosa pine. Effect on growth. U.S.D.A. For. Serv. Res. Paper PNW-68. Portland, Oregon. 9 p.
- Barros, S. 1991. Semillas y producción de plantas. En: *Eucalyptus*: Principios de Silvicultura y Manejo. Infor-Corfo. Santiago. pp: 15-41.
- Barros, S. 1993. Crecimiento juvenil de especies y procedencias de *Eucalyptus* – Los Copihues –provincia de Valdivia, X Región. En actas simposio: Los Eucaliptos en el desarrollo forestal de Chile. Pucón, Chile. pp: 207-226.
- Barry, K., M. Hall and C. Mohammed. 2003. Monitoring decay incidence and spread from pruning wounds of *Eucalyptus nitens*. CRC-SPF Annual Meeting. Cradle Mountain, Tasmania.
- Bartelink, H. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. Forest Ecology and Management 86: 193-203.
- Bartelink, H. 1998. A model of dry matter partitioning in trees. Tree Physiology 18: 91-101.
- Battaglia, M., C. Beadle and S. Lloughhead. 1996. Photosynthetic temperature responses of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. Tree Physiology 16: 81-89.

-
- Battaglia, M., M.L. Cherry, C.L. Beadle, P.J. Sands and A. Hingston. 1998. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiology* 18: 521-528.
- Battaglia, M., P.J. Sands and S. G. Candy. 1999. Hybrid growth model to predict height and volume growth in young *Eucalyptus globulus* plantations. *Forest Ecology and Management* 120: 193-201.
- Beadle, C.L., Honeysett, J.L., Turnbull, C.R.A. and White, D.A. 1995. Site limits to achieving genetic potential. In: *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality* (Eds. B.M. Potts, N.M.G. Borralho, J.B. Reid, R.N. Cromer, W.N. Tibbits and C.A. Raymond), pp: 325–331. CRC Temperate Hardwood Forestry, Hobart. Australia.
- Beadle, C. and J. Medhurst. 1999. Farm Forestry: Thinning. Technical Information. Sheet N° 21 Level 2. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry. Tasmania.
- Beets, P. and P. Lane. 1987. Specific leaf area of *Pinus radiata* as influenced by stand age, leaf age, and thinning. *N.Z.J. For. Sci.* 17(2/3):283-291.
- Bennett, L., C. Weston, T. Judd, P. Attiwill and P. Whiteman. 1989. The effects of fertilizers on early growth and folk nutrient concentrations of three plantation eucalypts on high quality sites in Gippsland, southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 89: 213-226.
- Bernardo, A., M. Reis, G. Reis, R. Harrison and D. Firme. 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 104: 1–13.

- Bocio, I., F. Navarro, M. Ripoll, M. Jiménez and E. De Simón. 2004. Holm oak (*Quercus rotundifolia* Lam.) and aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) response to different soil preparation techniques applied to forestation in abandoned farmland. *Ann. For. Sci.* 61: 171–178.
- Boland, D., M. Brooker and J. Turnbull. 1980. *Eucalyptus* Seeds. CSIRO. Australia. 191p.
- Borghetti, M., G.G. Vendramin and R. Giannini. 1986. Specific leaf area and leaf area index distribution in a young Douglas-fir plantation. *Can. J. For. Res.* 16: 1283-1288.
- Bredenkamp, B., F. Malan and E. Conradie. 1980. Some effects of pruning on growth and timber quality of *Eucalyptus grandis* in Zululand. *Sth. Afr. for. J.* 114: 29-34.
- Brix, H. and A. Mitchell. 1983. Thinning and nitrogen fertilization effects on sapwood development and relationships of foliage quantity to sapwood area and basal area in Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 13: 384-389.
- Brown, S., J. Gillespe and E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4): 881-902.
- Bulinski, J. and C. McArthur. 2003. Identifying factors related to the severity of mammalian browsing damage in eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 183: 239–247.
- Burkhart, H., and S. Walton. 1985. Incorporating crown ratio into taper equations for loblolly pine trees. *Forest Sci.* 31: 478-848.
- Caldentey, J., H. Bown y S. Donoso. 1992. Estimación de la biomasa total extraída bajo intervenciones silviculturales en bosques naturales de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Magallanes. 4º Encuentro científico sobre medio ambiente. CIPMA, Valdivia, Chile. Tomo I: 28p.

- Candy, S.G. 1997. Growth and yield models for *Eucalyptus nitens* plantations in Tasmania and New Zealand. *Tasforests* 9: 167-198.
- Cannell, M. 1989. Physiological basis of wood production: a review. *Scand. J. For. Res.* 4: 459-490.
- Carrasco, P. y J. Millán. 1990. Proyecto de suelos forestales de la VIII Región. Informe final. Universidad de Concepción, Depto. de Cs. Forestales/Min. de Agricultura. Chillán, Chile. 152 p.
- Castillón, P., P. Álvarez, R. Rodríguez y A. Rigueiro. 1998. Estudio de evaluación técnica de repoblaciones forestales. Editorial: Proxecto Columella. Escola Politécnica Superior de Lugo, Universidade de Santiago de Compostela, Lugo, España. 87p.
- Celhay, J.A., P. Bonnefoy y F. Riquelme. 1999. Efecto de la intensidad de poda sobre el crecimiento de *E. nitens*. En actas: Realidad y potencial de Eucalipto en Chile: Cultivo silvícola y su uso industrial. Silvotecnía XII, simposio IUFRO. 26-28 agosto 1999, Concepción, Chile. pp: 119-138.
- Cendoya, P. y F. Muñoz. 2002. Modelamiento del efecto del viento sobre árboles jóvenes de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* (23), N° 2:51-56.
- Cherry, M., A. Hingston, M. Battaglia and C. Beadle. 1998. Calibrating the LI-COR LAI-2000 for estimating leaf area index in eucalypt plantations. *Tasforests* Vol. 10: 75-82.
- Cherry, M., C. Macfarlane, P. Smethurst and C. Beadle. 2002. Visual guide to leaf area index of *Eucalypt* plantations. Cooperative Research centre for Sustainable Production forestry, Hobart, Australia. 24p.
- Ciesla, W., M. Diekmann and C. Putter. 1996. FAO/IPGRI Technical Guidelines for the Safe Movement of Germplasm. No. 17. *Eucalyptus* spp. Food and Agriculture

- Organization of the United Nations, Rome/International Plant Genetic Resources Institute, Rome.
- Clarke, C. 1999. Wood and pulp properties of four New South Wales provenances of *E. nitens* grown on a warm and a cold site in South Africa. En actas simposio: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile. XII Silvotecnica, Concepción, Chile.
- Close, D. and C. Beadle. 2003. Chilling-dependent photoinhibition, nutrition and growth analysis of *Eucalyptus nitens* seedlings during establishment. *Tree Physiology* 23: 217–226.
- Close, D. and C. Beadle. 2004. Total, and chemical fractions, of nitrogen and phosphorus in *Eucalyptus* seedling leaves: Effects of species, nursery fertiliser management and transplanting. *Plant and Soil* 259: 85–95.
- Close, D., C. Beadle and M. Battaglia. 2004. Foliar anthocyanin accumulation may be a useful indicator of hardiness in eucalypt seedlings. *Forest Ecology and Management* 198: 169–181.
- Cmpc, 1993. Funciones de volumen para *Eucalyptus globulus*, *nitens*, *regnans* y *delegatensis*. Área Forestal CMPC. Documento de circulación restringida. Concepción, Chile. 19p.
- Cotterill, P. and S. Macrae. 1997. Improving *Eucalyptus* pulp and paper quality using genetic selection and good organization. *Tappi Journal*, Vol 80(6): 82-89.
- Crc, 2001. News: CRC – SPF ready to strengthen international relations in China. Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry. Australia. Disponible en: http://members.forestry.crc.org.au/cgi-bin/doc.pl?rm=view_doc&doc_id=79, visto 17 febrero 2004.

- Cremer, K., C. Borough, F. McKinnell and P. Carter. 1982. Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 12 (2): 244-265.
- Daniel, P.W., U.E. Helms y F.S. Baker. 1982. *Principios de Silvicultura*. Segunda edición. McGraw-Hill, México. 492 p.
- Davidson, N., M. Battaglia and C. Beadle. 1995. Photosynthesis of *Eucalyptus nitens* is reduced by mild frosts. In: *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality* (Eds. B.M. Potts, N.M.G. Borralho, J.B. Reid, R.N. Cromer, W.N. Tibbits and C.A. Raymond), pp: 339-343. CRC Temperate Hardwood Forestry, Hobart.
- Donoso, S. 1999. Evaluación de prácticas silvícolas en plantaciones de *Eucalyptus globulus*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. España. 113p.
- Dutkowski, G., B. Potts, D. Williams, P. Kube and C. McArthur. 2001. Geographic genetic variation in central victorian *Eucalyptus nitens*. Cooperative Research Centre for Temperate Hardwood Forestry. Australia. Disponible en: http://members.forestry.crc.org.au/cgi-bin/doc.pl?doc_id=258, visto 17 febrero 2004.
- Eckmüllner, O. and H. Sterba. 2000. Crown condition, needle mass, and sapwood area relationship of Norway spruce (*Picea abies*). *Can. J. For. Res.* 30: 1646-1654.
- Ellis, B. 1992. The Regeneration of Highland Eucalypt Forests in Tasmania. CSIRO - Forestry and Forest Products. Australia. Disponible en: <http://www.ffp.csiro.au/publicat>, visto el 16 febrero 2004.-
- ENCE, 2004. Informe anual. Memoria de gestión 2004. Grupo Ence, España. 64p.

- Espinosa, M. and D. Perry. 1987. Distribution and increment of biomass in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates. *Can. J. For. Res.* 17: 722-730.
- Espinosa, M., J. García y O. Valeria. 1994. Efecto de intensidades diferentes de raleo en el crecimiento de un rodal de pino radiata. *Bosque* (15): 55-65.
- Eyles, A., N. Davies and C. Mohammed. 2003. Wound wood formation in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: anatomy and chemistry. *Can. J. For. Res.* 33: 2331–2339.
- FAO, 1981. El Eucalipto en la repoblación forestal. Colección FAO: Montes. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/DOCREP/004/AC459S/AC459S00.htm#TOC>, visto 19 febrero 2004.-
- FAO, 2002. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2000 - Informe Principal. Colección. Estudio FAO Montes 140. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 360p.
- Florence, R. 1996. Ecology and silviculture of eucalypt forests. CSIRO. Collingwood, Victoria, Australia. 413p.
- Forestal Mininco S.A., 2003. Prescripciones técnicas poda y raleos comerciales en *Eucalyptus nitens*. Forestal Mininco S.A. Trawü Mejorando el Negocio Forestal: “Plantando bien el Pino y Eucalipto”. Concepción, Chile.
- Francke, S. 1991. Efectos del manejo de los residuos de explotación en el suelo y el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus radiata*, en las series de suelos Coreo (zona arenales) y Colico (zona Arauco). Documento Técnico N° 51 y N° 52. Revista Chile Forestal. Corporación Nacional Forestal, Santiago. Chile.

- Gajardo, P. 2005. Efectos del raleo y clase de copa sobre el área foliar, la distribución del crecimiento y la eficiencia del crecimiento en árboles individuales de coigüe. Tesis de Magíster en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Concepción, Chile. 60p.
- García, E., A. Sotomayor, S. Silva y G. Valdebenito. 2000. Establecimiento de Plantaciones Forestales: *Eucalyptus sp.* Instituto Forestal, Chile. Disponible en:http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/map19-m.htm, visto 09 febrero 2004.
- Gardiner, B., H. Peltola and S. Kellomäki. 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling* 129: 1-23.
- Geldres, E., V. Gerding y J. Schlatter. 2004. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4 – 7 años de edad en un rodal de la Décima Región. En: Actas Segundo Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. En CD.
- Gerding, V., J. E. Schlatter y C. Saavedra. 2002. Biomasa de plantaciones de *Eucalyptus nitens* de 5 años en un suelo rojo arcilloso con fertilización, comuna de Fresia, X Región. En: Actas Primer Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 8 p.
- Gerrand, A., J. Medhurst and W. Nielsen. 1997. Thinning and pruning Eucalypt plantation for sawlog productions in Tasmania. *Tasforest*, Vol. 9:15-34.
- Gerrand, A. and W. Nielsen. 2000. Comparing square and rectangular spacings in *Eucalyptus nitens* using a Scotch plaid design. *Forest Ecology and Management* 129: 1-6.

- Glass, B. and H. Mackenzie. 1989. Decay distribución in relation to pruning and growth stress in plantation-grown *Eucalyptus regnans* in New Zealand. New Zealand Journal of Forestry Science. Vol 19: 210-222.
- Gorrini, B., H. Poblete, G. Hernández y F. Dunn. 2004. Tableros de partículas y MDF de *Eucalyptus nitens*: Ensayos a escala industrial. Revista Bosque, vol.25 (3): 89-97.
- Grandon, A. 2004. Efectos del raleo en la distribución de biomasa aérea en un renoval de coihue en Malalcahuello, Novena Región. En: Actas Segundo Congreso Chileno de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. En CD.
- Grunwald, C. and R. Karschon. 1974. Effect of seed origin on coppice regeneration in *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. Silvae Genet. 23: 141-144.
- Guillespie, A., H.L. Allen and J. Vose. 1994. Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine trees as affected by canopy position and silvicultural treatment. Can. J. For. Res. Vol. 24. 1337-1344.
- Gutiérrez, L., A. Casares, R. Sánchez-Tamés and J. Majada. 2002. Early growth, biomass allocation and physiology in the three *Eucalyptus nitens* populations under different water regimes. Forestry, Vol.75(2): 139-148.
- Humara, J., M. López, A. Casares and J. Majada. 2000. Temperature y provenance as two factors affecting *Eucalyptus nitens* seed germination. Forestry, Vol.73(1): 87-90.
- Hunt, M. and C. Beadle. 1998. Whole-tree transpiration and water-use partitioning between *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in a short-rotation plantation in northeastern Tasmania. Tree Physiology 18: 557-563.
- Hush, B., C. Miller and T. Beers. 1982. Forest Mensuration. Krieger Publishing. New York. USA. 402 p.

- Infor. 2004. *Eucalyptus nitens* en Chile: Primera monografía. Informe Técnico N° 165. Instituto Forestal. Valdivia. Chile. 143 p.
- Infor. 2004b. *Eucalyptus nitens* en Chile: Procesos industriales de la madera. Informe Técnico N° 164. Instituto Forestal. Valdivia. Chile. 142p.
- Infor. 2004c. *Eucalyptus nitens* en Chile: Economía y mercado. Informe Técnico N° 166. Instituto Forreestal. Valdivia, Chile. 80p.
- Ingerslev, M and L. Hallbäcken. 1999. Above ground biomass and nutrient distribution in a limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies*) plantation. Part II. Accumulation of biomass and nutrients. Forest Ecology and Management 119: 21-38.
- Ipinza, R., B. Gutiérrez, M. Molina y V. Emhart. 1998. ¿Cómo obtener las máximas ganancias genéticas en *Eucalyptus nitens* y no morir en el intento?. Instituto Forestal, Chile. Disponible en: <http://www.infor.cl/webinfor/F-lemu/1998-sep/eucalypt.pdf>, visto 09 febrero 2004.-
- Jerez, M., T. Dean, Q. Cao and S. Roberts. 2005. Describing Leaf Area Distribution in Loblolly Pine Trees with Johnson's SB Function. Forest Science 51(2): 93-101.
- Jiang, Z. and S. Zhang. 2003. China's plantation forests for sustainable wood supply and development. En: Actas del XIII Congreso Forestal Mundial, Québec, Canadá.
- Jobet, P. 1999. Efecto del espaciamiento inicial sobre el crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus nitens* plantado en suelo trumao. En actas: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile: Cultivo silvícola y su uso industrial, pp: 43-70. Silvotecna XII, simposio IUFRO. 26-28 agosto 1999, Concepción, Chile.
- Keane, R., E. Reinhardt, J. Scott, K. Gray and J. Reardon. 2005. Estimating forest canopy bulk density using six indirect methods. Can. J. For. Res. 35: 724-739.

- Kube, P. and C. Raymond. 2002. Breeding to minimize the effects of collapse in *Eucalyptus nitens*. Technical Report 93 Project A5: Wood quality. Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, Hobart, Tasmania, Australia. 18 p.
- Laffan, M.D., P. Naughton, S. Hetherington and S. Rees. 2003. Comparison of the effects of spot and strip cultivation on the early growth of *Eucalyptus nitens* and *Pinus radiata* in Tasmania. *Tasforests*, Vol. 14:137-144.
- Landsberg, J. and R. Waring. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95: 209-228.
- Landsberg, J. J., and S. T. Gower. 1997. *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*. Academic Press. San Diego, U.S.A. 354 p.
- Larsen, D. 1999. Girard form class trends from the Missouri Ozark Forest Ecosystem Project. Notes for managers. Report N° 4. Missouri Department of Conservation. Missouri, USA. 4 p.
- Lausberg, M., F. Gilchrist and J. Skipwith. 1995. Wood properties of *Eucalyptus nitens* grown in New Zealand. *N.Z. Journal of Forestry Science*, Vol 25(2): 147-163.
- Lignum. 2003. *Eucalyptus nitens*: La nueva estrella del sector forestal. *Revista Lignum* N°67 (noviembre 2003), pp: 59-61. Fundación Chile. Santiago, Chile.
- Lignum. 2005. *Eucalyptus nitens*: Mucho más que sólo una opción pulpable. *Revista Lignum* N°80 (junio 2005), pp: 52-55. Fundación Chile. Santiago, Chile.
- Little, K., G. van den Berg and G. Fuller. 2002. Coppicing potential of *Eucalyptus nitens*: results from a field survey. *S. Afr. For. J.* 193: 31–38.

- Little, K. and R. Gardner. 2003. Coppicing ability of 20 *Eucalyptus* species grown at two high-altitude sites in South Africa. *Can. J. For. Res.* 33: 181-189.
- Lorenzo, J.J. y J.G. Álvarez. 1999. Primeros resultados de crecimiento y producción de las masas de *Eucalyptus nitens* en la provincia de Lugo. Actas del Congreso de Ordenación y Gestión Sostenible de Montes. Santiago de Compostela, 4-9 de octubre de 1999. Tomo I: 605-611.
- Maclaren, J. 1993. Radiata pine Grower's Manual. New Zealand Forest Research Institute. FRI Bulletin 184. Rotorua, New Zealand. 140 p.
- McArthur, C., A. Goodwin and S. Turner. 2000. Preferences, selection and damage to seedlings under changing availability by two marsupial herbivores. *Forest Ecology and Management* 139: 157-173.
- Meadows, J. and J. Hodges. 2002. Sapwood Area as an Estimator of Leaf Area and Foliar Weight in Cherrybark Oak and Green Ash. *Forest Science*, Vol. 48 (1): 69-76.
- Medhurst, J. and C. Beadle. 2000. Thinning for solid wood products in *Eucalyptus nitens* plantations. In: *The Future of Eucalypts for Wood Products*, pp: 343-348. Eds. L. Henderson, G. Waugh, G. Nolan and P. Bennett. Proceedings of IUFRO Conference, 19-24 March 2000, Launceston, Australia.
- Medhurst, J. and C. Beadle. 2001. Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. *Tree Physiology* 21, 989-999.
- Medhurst, J.L., C.L. Beadle and W.A. Neilsen. 2001. Early-age and later-age thinning affects growth, dominance, and intraspecific competition in *Eucalyptus nitens* plantations. *Can. J. For. Res.* 31: 187-197.

- Medhurst, J., M. Battaglia and C. Beadle. 2002. Measured and predicted changes in tree and stand water use following high-intensity thinning of an 8-year-old *Eucalyptus nitens* plantation. *Tree Physiology* 22: 775–784.
- Meskimen, G. and J. Francis. 1990. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Rose gum *Eucalyptus*. En: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., eds. *Silvics of North America: 2. Hardwoods*. Agric. Handb. 654. Washington DC, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, USA. pp: 305-312.
- Misra, R., C. Turnbull, R. Cromer, A. Gibbons and A. LaSala. 1998. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation. I. Biomass. *Forest Ecology and Management* 106: 283-293.
- Misra, R., C. Turnbull, R. Cromer, A. Gibbons, A. LaSala and L. Ballard. 1998b. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation. II. Nitrogen and phosphorus. *Forest Ecology and Management* 106: 295-306.
- Mitchell, S. 2000. Stem growth responses in Douglas-fir and Sitka spruce following thinning: Implications for assessing wind-firmness. *Forest Ecology and Management* 135: 105-114.
- Mohammed, C., K. Barry, M. Battaglia, C. Beadle, A. Eyles, A. Mollon and E. Pinkard. 2000. Pruning-associated stem defects in plantation *E. nitens* and *E. globulus* grown for sawlog and veneer in Tasmania, Australia. In: *The Future of Eucalypts for wood products*, pp: 357-364. Eds. L. Henderson, G. Waugh, G. Nolan and P. Bennett. *Proceedings of IUFRO Conference, 19-24 March 2000, Launceston, Australia*.
- Moncur, M. and O. Hasan. 1994. Floral induction in *Eucalyptus nitens*. *Tree Physiology* 14: 1303-1312.
- Monserud, R. and J. Marshall. 1999. Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Can. J. For. Res.* 29: 521-535.

- Montagu, K., D. Kearney and G. Smith. 2003. Pruning Eucalypts: The biology and silviculture of clear wood production in planted eucalypts. Rural Industries Research and Development Corporation. Australia. 36p.
- Moore, J. 2000. Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on range of soil types. In: Wind and Trees. Eds. M. Coutts and J. Grace, Cambridge University Press, Cambridge, England. pp: 63-71.
- Mori, A. and H. Takeda. 2004. Functional relationships between crown morphology and within-crown characteristics of understory saplings of three codominant conifers in a subalpine forest in central Japan. *Tree Physiology* 24: 661–670.
- Moroni, M., D. Worledge and C. Beadle. 2003. Root distribution of *Eucalyptus nitens* and *E. globulus* in irrigated and droughted soil. *Forest Ecology and Management* 177: 399-407.
- Morris, J., Z. Ningnan, Y. Zengjiang, J. Collopy and X. Daping. 2004. Water use by fast-growing *Eucalyptus urophylla* plantations in southern China. *Tree Physiology* 24: 1035-1044.
- Muhairwe, C. 1994. Tree form and taper variation over time for interior lodgepole pine. *Can. J. For. Res.* 24: 1904-1913.
- Muñoz, F. y M. Espinosa. 1999. Efecto de poda y raleo en el crecimiento de un rodal de *Eucalyptus nitens*. En actas: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile: Cultivo silvícola y su uso industrial, pp: 89-118. Silvotecna XII, simposio IUFRO. 26-28 agosto 1999, Concepción, Chile.
- Muñoz, F. y M. Espinosa. 2001. Evaluación de la capacidad de retoñación de *Eucalyptus nitens* a campo abierto y bajo dosel. En actas: Simposio Internacional IUFRO. Desarrollando el Eucalipto del futuro, 13p. Instituto Forestal, 10-15 Sep. 2001, Valdivia, Chile.

- Muñoz, F. 2002. Balance nutritivo de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden de 7 años de edad en suelos ñadi. Memoria de título. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 108 p.
- Muñoz, F., M. Espinosa, E. Acuña y M. Lineros. 2003. Capacidad de retoñación de *Eucalyptus nitens* a campo abierto y bajo dosel. p. 375 en: Actas del Congreso. B - Bosques para el planeta. XIII Congreso Forestal Mundial. 21-28 de septiembre, Québec, Canadá.
- Muñoz, F., M. Espinosa, M.A. Herrera y J. Cancino. 2005. Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. *Bosque* 26(1): 93-99.
- Navarrete, P. y C. Vergara. 1999. Estudio del uso industrial del *Eucalyptus nitens*. Tesis Ingeniero Civil en Industrial Forestales. Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile. 78p.
- Nielsen, A., and A. Gerrand. 1999. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacing and the effect on final crop selection. *Forest Ecology and Management* 123: 217-229.
- Neilsen, W. and E. Pinkard. 2000. Developing silvicultural regimes for sawlog and veneer production from temperate eucalypt plantations in Tasmania. In: *The Future of Eucalypts for wood products*, pp: 335-348. Eds. L. Henderson, G. Waugh, G. Nolan and P. Bennett. Proceedings of IUFRO Conference, 19-24 March 2000, Launceston, Australia.
- Newnham, R. 1988. A variable-form taper function. Information report PI-X-83. Petawawa National Forestry Institute, Forestry Canada, Ontario, Canada. 33 p.
- Nicholls, J. and Pederick, L. 1979. Variation in some Wood characteristics in *Eucalyptus nitens*. *Aus. For. Res.* Vol 9: 304-321.

- Norman, J.M. and G.S. Campbell. 1989. Canopy structure. In : Plant Physiological Ecology : Field methods and instrumentation, pp: 301-325. Eds. R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel. Chapman and Hall, London and New York.
- Oliver, C.D. and B.C. Larson. 1996. Forest stand dynamics. McGraw-Hill, New York. 520p.
- Pardé, J. 1980. Forest biomass. Review article. Forest Products Abstract 41(8): 343-362.
- Parra, I. 1999. Identificación de hongos de pudrición de madera en algunas especies del género *Eucalyptus*. Memoria de título. Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Silvicultura. Concepción, Chile. 63p.
- Paz, J. y L. Pérez. 1999. Análisis comparativo de las propiedades microscópicas y macroscópicas de la madera de *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus*. Actas simposio: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile. XII Silvotecna, Concepción, Chile.
- Peredo, M. 1999. Aptitud pulpable de *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus regnans* cultivados en Chile. En actas simposio: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile. XII Silvotecna, Concepción, Chile.
- Pérez, A. y S. Montesinos. 1992. Silvicultura intensiva del *Eucalyptus*. Forestal Mininco S.A. Documento de divulgación interna. Concepción. 9p.
- Perry, D. 1994. Forest Ecosystem. The Johns Hopkins University Press. Baltimore, USA. 649 p.
- Peters, R., M. Jobet y S. Aguirre. 1985. Compendio de tablas auxiliares para el manejo de plantaciones de pino insigne. Manual N° 14. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 140p.

-
- Petty, J. and C. Swain. 1985. Factors influencing stem breakage of conifers in high winds. *Forestry* 58: 75-84.
- Pinilla, J., M. Ferrando, C. Bahamondez, M. Martin y P. Molina. 2001. Investigación modelo de crecimiento para Eucalipto en Chile. En actas simposio IUFRO: Los Eucaliptos en el desarrollo forestal de Chile, 15p. Valdivia, Chile, 10-15 Sep. 2001.
- Pinkard, E., C. Beadle, N. Davidson and M. Battaglia. 1995. Changes in crown productivity and stem growth of *Eucalyptus nitens* in response to green pruning. In *Eucalyptus plantations: Improving Fibre Yield and Quality*, pp: 377-378. Eds. B. Potts, N. Borralho, J. Reid, R. Cromer, W. Tibbits and C. Raymond. Proceedings CRCTHF – IUFRO Conference, Feb 19-24, 1995. Hobart, Australia.
- Pinkard, E. and C. Beadle. 1998. Aboveground biomass partitioning and crown architecture of *Eucalyptus nitens* following green pruning. *Can. J. For. Res.* 28: 1419-1428.
- Pinkard, E. and C. Beadle. 1998b. Effects of green pruning on growth and stem shape of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden. *New Forests* 15: 107–126, 1998.
- Pinkard, E. and C. Beadle. 1998c. Regulation of photosynthesis in *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden following green pruning. *Trees* 12:366–376.
- Pinkard, E., M. Battaglia, C. Beadle and P. Sands. 1999. Modeling the effect of physiological responses to green pruning on net biomass production of *Eucalyptus nitens*. *Tree Physiology* 19: 1-12.
- Pinkard, E. and M. Battaglia. 2001. Using hybrid models to develop silvicultural prescriptions for *Eucalyptus nitens*. *Forest Ecology and Management* 154: 337-345.

- Pinkard, E. 2002. Effects of pattern and severity of pruning on growth and branch development of pre-canopy closure *Eucalyptus nitens*. Forest Ecology and Management 157: 217-230.
- Pinkard, E. and E. Nielsen. 2003. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: Implications for thinning. Forest Ecology and Management 172: 215-227.
- Prado, J. y S. Barros. 1989. *Eucalyptus*. Principios de silvicultura y manejo. Instituto Forestal, División Silvicultura. Corfo. Santiago. 199p.
- Prado, J., J. Bañados y A. Bello. 1990. Antecedentes sobre la capacidad de retoñación de algunas especies del género *Eucalyptus* en Chile. Revista Ciencia e Investigación Forestal. Vol 4(2): 183-190.
- Prado, J.A. y S. Barros. 1991. *Eucalyptus*. Principios de silvicultura y manejo. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 199 p.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. IICA-GTZ. San José, Costa Rica. 561p.
- Purse, J. and Richardson, K. 2001. Short rotation single item tree crops for energy in the UK -an examination with *Eucalyptus*. Aspects of Applied Biology N° 65. Biomass an Energy Crops II.
- Pyme. 2003. Forestales potencian al *Eucalyptus nitens*. Artículo Diario Pyme. Chile. Disponible en: <http://www.diariopyme.cl/newtenberg/1550/article-56770.html>, visto 09 febrero 2004.
- Quiñónez, I., V. Sepúlveda y F. Halabi. 2005. Identificación de Especies de *Eucalyptus*. CMPC Celulosa Planta Santa Fe. II Coloquio Internacional sobre celulosa de

- Eucalipto. Asociación Técnica de la Celulosa y el Papel. Concepción (Chile). 24-26 mayo de 2005. En CD.
- Raga, F. 2003. Madera sólida de *Eucalyptus*: una tendencia para considerar. Revista Lignum N° 61 (agosto 2003). Fundación Chile, Santiago. Chile.
- Roberts, S., J. Long and F. Smith. 1993. Canopy stratification and leaf area efficiency: a conceptualization. *Forest Ecology and Management* 60:143-156.
- Rodríguez, R. 2002. Effects of silvicultural regime on leaf, allometry, growth allocation and productivity in *Pinus radiata* D. Don. Tesis de Doctorado en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Concepción, Chile. 109p.
- Rodríguez, R. y P. Real. 2004. Aplicación de modelos de procesos y SIG para predicción de la productividad de *Eucalyptus nitens* en la VIII Región. En actas XIX Silvotecnica: Herramientas tecnológicas para mejorar la eficiencia de operaciones silvícolas. 17-18 Nov. 2004, Concepción, Chile.
- Rojas, P., M. Aravena y L. Cid. 1993. Primeros resultados de floración y producción de semillas de *E. nitens* (Maiden) bajo condiciones in vitro. En: Investigación y desarrollo forestal en la pequeña propiedad. Proyecto FDI. Forestal Mininco, Forestal Simpson-Chile, INIA, Universidad de Concepción. FDI-Corfo. pp: 172-175.
- Rozas, C. 2002. Resultados tecnológicos proyecto Fondef D9811018: Diversificación y aprovechamiento de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* para su utilización en la industria del mueble. Universidad del Bío Bío. Concepción. Chile. pp: 29-86.

- Ruiz, J., M. Peredo, J. Rodríguez, J. Baeza y J. Freer. 2005. Aplicación de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) en la industria forestal: Clasificación de maderas de *Eucalyptus* y predicción de propiedades. Bioforest S.A. - Universidad de Concepción. II Coloquio Internacional sobre Celulosa de Eucalipto. Asociación Técnica de la Celulosa y el Papel. Concepción (Chile). 24-26 mayo de 2005. En CD.
- Salisbury, F. y C. Ross. 1994. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamérica, México. 759 p.
- Sands, P., M. Battaglia and D. Mummery. 2000. Application of process-based models to forest management: experience with PROMOD, a simple plantation productivity model. *Tree Physiology* 20(5/6): 383-392.
- Sands, P. and J. Landsberg. 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management* 163 (2002) 273–292.
- Sands, P. 2003. Parameterisation and application of 3-PG as a management tool for *Eucalyptus grandis* in South Africa – report on a visit to the Institute for Commercial Forestry Research. Technical Report 124. CRC for Sustainable Production Forestry and CSIRO Forestry and Forest Products. Hobart, Australia. 5p.
- Santibáñez, F. y J. Uribe. 1993. Atlas Agroclimático de Chile, regiones sexta, séptima, octava y novena. Corporación de Fomento. Ministerio de Agricultura. FIA. Santiago, Chile. 99 p.
- SAS Institute. 1985. SAS/STAT Guide for personal computers, Version 6 Edition. Cary, NC, USA. 378p.

- Schlegel, B., J. Gayoso. y J. Guerra. 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Proyecto Fondef D98I1076 - Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 53p.
- Schimleck, L., P. Wright, A. Michell and A. Wallis. 1997. Near infrared spectra and chemical composition of *E. globulus* and *E. nitens* plantation woods. *Appita* 50(1):40-46.
- Scott, S., C. McArthur, B. Potts and K. Joyce. 2002. Possum browsing -the downside to a eucalypt hybrid developed for frost tolerance in plantation forestry. *Forest Ecology and Management* 157: 231-245.
- Sedjo, R.A. 2001. De la recolección al cultivo: la transición a las plantaciones forestales y sus repercusiones sobre la oferta y demanda de madera. *Unasyuva*, 1/2001, Volumen 52, N° 204.
- Shield, E. 1999. Utilización de la madera de Eucalipto de plantaciones en el contexto de mercados globales, particularmente *Eucalyptus nitens* (partes 1 y 2). En actas simposio: Realidad y potencial del Eucalipto en Chile. XII Silvotecna, Concepción, Chile.
- Simioni, G., J. Gignoux, X. Le Roux, R. Appé and D. Benest. 2004. Spatial and temporal variations in leaf area index, specific leaf area and leaf nitrogen of two co-occurring savanna tree species. *Tree Physiology* 24: 205–216.
- Sims, R., T. Maiava and B. Bullock. 2001. Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 20, N° 5: 329-335.
- Smethurst, P., C. Baillie, M. Cherry and G. Holz. 2003. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. *Forest Ecology and Management* 176: 531-542.

- Smethurst, P., G. Holz, M. Moroni and C. Baillie. 2004. Nitrogen management in *Eucalyptus nitens* plantations. *Forest Ecology and Management* 193: 63-80.
- Smith, W. 1970. *Tree Pathology: A short introduction, the mechanisms and control of pathological stresses of forest trees*. Academia Press, Nueva York. 309p.
- Smith, D., B. Larson, M. Kelty and P. Ashton. 1997. *The practice of silviculture. Applied forest ecology*. 9th ed. John Wiley and Sons. New York, USA. 537 p.
- Stape, J. L., D. Binkley, M. Ryan y A. Do Nascimento-Gomes. 2004. Utilización del agua, limitación hídrica y eficiencia del uso del agua en una plantación de *Eucalyptus*. *Bosque* vol.25(2): 35-41.
- StatSoft, Inc. 2001. *STATISTICA (data analysis software system)*, version 6. www.statsoft.com.
- Steel, R. y J. Torrie. 1988. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. McGraw-Hill/Interamericana de México. México. 622 p.
- Stöckle, M. 1996. Efecto inicial de poda y raleo en el crecimiento de un rodal de *Eucalyptus nitens* de 6 años de edad. Memoria de Título. Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Silvicultura. Concepción, Chile. 26 p.
- Sutton, W. 1985. Pino radiata: Sus excepcionales perspectivas en el comercio mundial de productos forestales. Publicación Técnica N° 17. Fundación Chile, Departamento Forestal. Santiago, Chile. 32 p.
- Teller, A. 1988. Biomass, productivity and wood waste evaluation in a spruce (*Picea abies*) forest. *Commonwealth Forestry Review* 67(2): 129-147.

- Ter-Mikaelian, M. T., and M. D. Korzukhin. 1997. Biomass equation for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- Tibbits, W. 1991. Flowering and seed yields in orchards of *Eucalyptus nitens*. In: Proceeding of the 9th meeting of representative of the research working group 1 of the Australian Forestry Council. Coonawara. 79p.
- Tibbits, W., D. Boomsma and S. Jarvis. 1997. Distribution, biology, genetics, and improvements programs for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* around the world. In: The 24th Biennial Southern Forest Tree Improvement Conference, pp: 81-95. June 9-12, 1997. Orlando, Florida, USA.
- Toro, J. 2002. Acumulación de calcio en plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*. *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo*. Vol. 18, p. 244-48.
- Touza, M. y F. Sanz. 2002. Nuevas aplicaciones de la madera de Eucalipto. *Revista CIS-Madera*, Galicia, España. Número 9: 6-22.
- Troncoso, C. 2004. Caracterización de patrones de comportamiento de *Chilecomadia valdiviana* (Philippi) (Lepidoptera: Cossidae), en el ataque a *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, con manejos silvícolas de poda y raleo, y ensayo de control mediante técnicas de árboles cebos, en la precordillera de Los Angeles VIII Región. Memoria de título, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 98p.
- Ulloa, C. 2003. Comparación de tasas de crecimiento en una plantación de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* establecido bajo dos regimenes de residuos (con quema y sin quema), en un mismo sitio. Memoria de título, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 62p.
- Van Wyk, G. 1981. Pollen management for *Eucalyptus*. In: *Pollen management handbook* N° 587. Forest Service, USDA. USA.

- Vanninen, P. and A. Mäkelä. 2000. Needle and stem wood production in scots pine (*Pinus sylvestris*) trees of different age, size and competitive status. *Tree Physiol.* 7:527-533.
- Vose, J. and H. Allen. 1988 Leaf area, stem wood growth, and nutrition in loblolly pine. *For. Sci.* 34, 547–563.
- Wardlaw, T. and W. Neilsen. 1999. Decay and other defects associated with pruned branches of *Eucalyptus nitens*. *Tasforests* Vol. 11: 49-57.
- Waring, R., W. Thies and D. Muscato. 1980. Stem growth per unit of leaf area: a measure of tree vigor. *Forest Sci.* 26:112-117.
- Waring, R. and W. Schlesinger. 1985. *Forest Ecosystem*. Academic Press, New York, 339p.
- White, D., C. Beadle and D. Worledge. 1996. Leaf water relations of *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* and *E. nitens*: seasonal, drought and species effects. *Tree Physiology* 16: 469-476.
- Whitehead, D. 1978. The estimation of foliage area from sapwood basal area in Scots pine. *Forestry* 51: 137-149.
- Wimmer, R., G. Downes and R. Evans. 2002. High-resolution analysis of radial growth and wood density in *Eucalyptus nitens*, grown under different irrigation regimes. *Ann. For. Sci.* 59: 519–524.
- Wiseman, D., M. Hall, K. Barry, C. Beadle, L. Pinkard and C. Mohammed. 2003. Tree nutrition affects the incidence and extent of wood decay. Poster CRC-SPF Annual Meeting. Cradle Mountain, Tasmania.

Wonn, H. and O'Hara K. 2001. Height/Diameter ratios and stability relationships for four northern rocky mountain tree species. *Western Journal of Applied Forestry* 16 (2): 87-94.

Yang, J. and G. Waugh. 1996. Potential of plantation-grown *Eucalypts* for structural sawn products. II *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden and *Eucalyptus regnans* F. Muell. *Australian Forestry*, Vol 59(2):99-107.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

(Extraído de: Carrasco, P. y J. Millán. 1990. Proyecto de suelos forestales de la VIII Región. Informe final. Universidad de Concepción, Depto. de Cs. Forestales/Min. de Agricultura. Chillán, Chile. 152 p.).

Descripción general

El área de estudio se ubica en suelos derivados de sedimentos marinos. En estos suelos el relieve está constituido principalmente por plataformas litorales y terrazas marinas del terciario y, en menor proporción, por llanuras arenosas fluvio marinas que se extienden desde la bahía de Talcahuano hacia el sur, fuertemente tectonizadas por fallas geológicas, disectadas por valles fluviales con fuertes pendientes. El material generador de la zona costera, lo constituyen fundamentalmente arcillas marinas del plioceno, mientras que hacia la parte central predominan arenas y arcillas continentales.

Son suelos plásticos y adhesivos en húmedo, duros y compactos en seco, pudiendo presentar concreciones de fierro y maganeso, con o sin grava cuarzosa. Las estructuras superficiales son bloques subangulares medios y finos, a medida que aumenta el contenido de arcilla origina estructura prismáticas firmes o de bloques subangulares grandes a medios. El clima es mediterráneo, con amplitud térmica moderada (estación tipo Concepción), la pluviometría fluctúa entre 1.300 – 1.500 mm al año.

La vegetación nativa estaba constituida por matorral mesomórfico a bosque de transición, que fue totalmente explotada para habilitar suelos para actividades agrícolas y ganaderas. Actualmente está alterada o sustituida por plantaciones en las que predomina el pino radiata.

Según el proyecto Aerofotogramétrico del año 1964, este grupo de suelos lo conforman cuatro series de importancia forestal: Curanipe (CPE), Curanilahue (CHE), Cobquecura (KQ) y Colico (CLO). El lugar del estudio se ubica en suelos de la serie Curanipe (CPE).

Serie Curanipe (CPE)

Clasificación:	Orden Alfisol, sub orden Xeralfs
Geomorfología:	Plataformas litorales o terrazas marinas
Topografía:	Lomajes suaves
Pendiente:	6% uniforme
Material de origen:	Sedimentos marinos
Vegetación natural:	Matorral costero a bosque de transición
Drenaje:	Externo rápido, interno bueno
Erosión:	De manto intensa en sectores con pendiente fuertes
Capacidad de uso:	VI. Apta para pastoreo y forestación, pero susceptible a la erosión
Ubicación calicata:	37° 34' y 73° 24'
Altitud:	160 m.s.n.m.

Descripción del perfil**1. Horizontes orgánicos**

L (Ol) 1,0 cm: constituido por desechos orgánicos reconocibles a simple vista, sin cambios morfológicos importantes, predominan acículas, corteza, ramas, ramillas y conos de pino radiata.

F (Of) 0,8 cm: Material orgánico alterado reconocible a simple vista, con bajo contenido de sustancia orgánica fina, difiere en color del subyacente.

H (Oh) 1,5 cm: horizonte húmico de color oscuro con escasos residuos orgánicos reconocibles, con gran predominio de sustancia orgánica fina respecto a la mineral del suelo.

2. Horizontes minerales

A1 0-16 cm: color 10YR 3/4 en húmedo seco (pardo amarillento oscuro), textura franco arcillosa; estructura de bloques subangulares finos a medios; ligeramente plástico y adhesivo en húmedo, duro y compacto en seco.

Abundancia de raíces y raicillas, fácilmente penetrable por las raíces. Límite inferior bien definido.

A2 16-51 cm: color 7,5 YR 3/2 en húmedo (pardo oscuro); 5YR 4/4 en seco (pardo rojizo); textura arcillosa; estructura bloques subangulares medios a gruesos firmes, plástico y adhesivo en húmedo, duro en seco; fácilmente penetrable por las raíces; abundancia de raíces, raicillas y micorrizas; límite inferior difuso.

Bt1 51-75 cm: color 5YR 4/3 en húmedo (pardo rojizo); 5YR 4/4 en seco (pardo rojizo); textura arcillosa; estructura bloques subangulares fuertes; muy plástico y adhesivo en húmedo, duro y compacto en seco; raíces y raicillas comunes con presencia de micorrizas; límite inferior difuso.

Bt2 75-130 cm: color 5YR 4/4 en húmedo (pardo rojizo); 5YR 4/6 en húmedo (rojo amarillento); estructura bloques subangulares medios; muy plástico y adhesivo en húmedo, duro y compacto en seco; raíces y raicillas escasas.

Observaciones

Presenta una fase de erosión fuerte y otra muy erosionada. Las limitantes al cultivo de plantaciones son:

Físicas: la erosión laminar intensa que afecta grandes superficies; la compactación de los horizontes inferiores; la escasa profundidad en algunos sectores.

Químicas: los niveles medios de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en el primer horizonte y bajos los restantes; bajos contenidos de calcio en todo el perfil.

Fisiográficas: la exposición oeste en la zona litoral, que somete a las plantaciones a fuertes vientos durante casi todo el año.

ANEXO A.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PARCELAS ESTABLECIDAS

Las parcelas se establecieron en plantaciones de *Eucalyptus nitens* realizadas en el año 1989. El predio es de propiedad de la empresa Bosques Arauco y está localizado en la cercanía de la localidad de Los Álamos, provincia de Arauco, zona central de Chile. La descripción de las parcelas establecidas se presenta en la siguiente la Tabla A.2.

Tabla A.2. Descripción de los tratamientos establecidos en ensayo fundo Los Álamos

Tratamiento	Parcela	Código Tratamiento	Descripción	Densidad Raleo arb/ha	Intensidad Poda m	Porcentaje Arboles %
0	12	T 0	SIN PODA Y SIN RALEO	1100	0	100
0	27	T 0	SIN PODA Y SIN RALEO	1100	0	100
0	31	T 0	SIN PODA Y SIN RALEO	1100	0	100
1	11	T 1	PODA A 3,5 M Y SIN RALEO	1100	3,5	100
1	23	T 1	PODA A 3,5 M Y SIN RALEO	1100	3,5	100
1	32	T 1	PODA A 3,5 M Y SIN RALEO	1100	3,5	100
2	2	T 2	PODA A 7,0 Y SIN RALEO	1100	7	100
2	13	T 2	PODA A 7,0 Y SIN RALEO	1100	7	100
2	26	T 2	PODA A 7,0 Y SIN RALEO	1100	7	100
3	14	T 3	SIN PODA Y RALEO A 800 ARB/HA	800	0	100
3	19	T 3	SIN PODA Y RALEO A 800 ARB/HA	800	0	100
3	22	T 3	SIN PODA Y RALEO A 800 ARB/HA	800	0	100
4	16	T 4	PODA A 3,5 M Y RALEO A 800 ARB/HA	800	3,5	100
4	24	T 4	PODA A 3,5 M Y RALEO A 800 ARB/HA	800	3,5	100
4	35	T 4	PODA A 3,5 M Y RALEO A 800 ARB/HA	800	3,5	100
5	10	T 5	PODA A 7,0 M Y RALEO A 800 ARB/HA	800	7	100
5	28	T 5	PODA A 7,0 M Y RALEO A 800 ARB/HA	800	7	100
5	39	T 5	PODA A 7,0 M Y RALEO A 800 ARB/HA	800	7	100
6	5	T 6	SIN PODA Y RALEO A 400 ARB/HA	400	0	100
6	7	T 6	SIN PODA Y RALEO A 400 ARB/HA	400	0	100
6	25	T 6	SIN PODA Y RALEO A 400 ARB/HA	400	0	100
7	3	T 7	PODA A 3,5 M Y RALEO 400 ARB/HA	400	3,5	100
7	15	T 7	PODA A 3,5 M Y RALEO 400 ARB/HA	400	3,5	100
7	21	T 7	PODA A 3,5 M Y RALEO 400 ARB/HA	400	3,5	100
8	9	T 8	PODA A 7,0 M Y RALEO 400 ARB/HA	400	7	100
8	17	T 8	PODA A 7,0 M Y RALEO 400 ARB/HA	400	7	100
8	37	T 8	PODA A 7,0 M Y RALEO 400 ARB/HA	400	7	100
9	8	T 9	PODA A 3,5 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 800	800	3,5	50
9	34	T 9	PODA A 3,5 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 800	800	3,5	50
9	38	T 9	PODA A 3,5 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 800	800	3,5	50
10	4	T10	PODA A 7,0 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 800	800	7	50
10	20	T10	PODA A 7,0 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 800	800	7	50
10	29	T10	PODA A 7,0 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 800	800	7	50
11	1	T 11	PODA A 3,5 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 400	400	3,5	50
11	6	T 11	PODA A 3,5 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 400	400	3,5	50
11	33	T 11	PODA A 3,5 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 400	400	3,5	50
12	18	T 12	PODA A 7,0 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 400	400	7	50
12	30	T 12	PODA A 7,0 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 400	400	7	50
12	36	T 12	PODA A 7,0 M AL 50% DE LOS ARBOLES EN RALEO 400	400	7	50

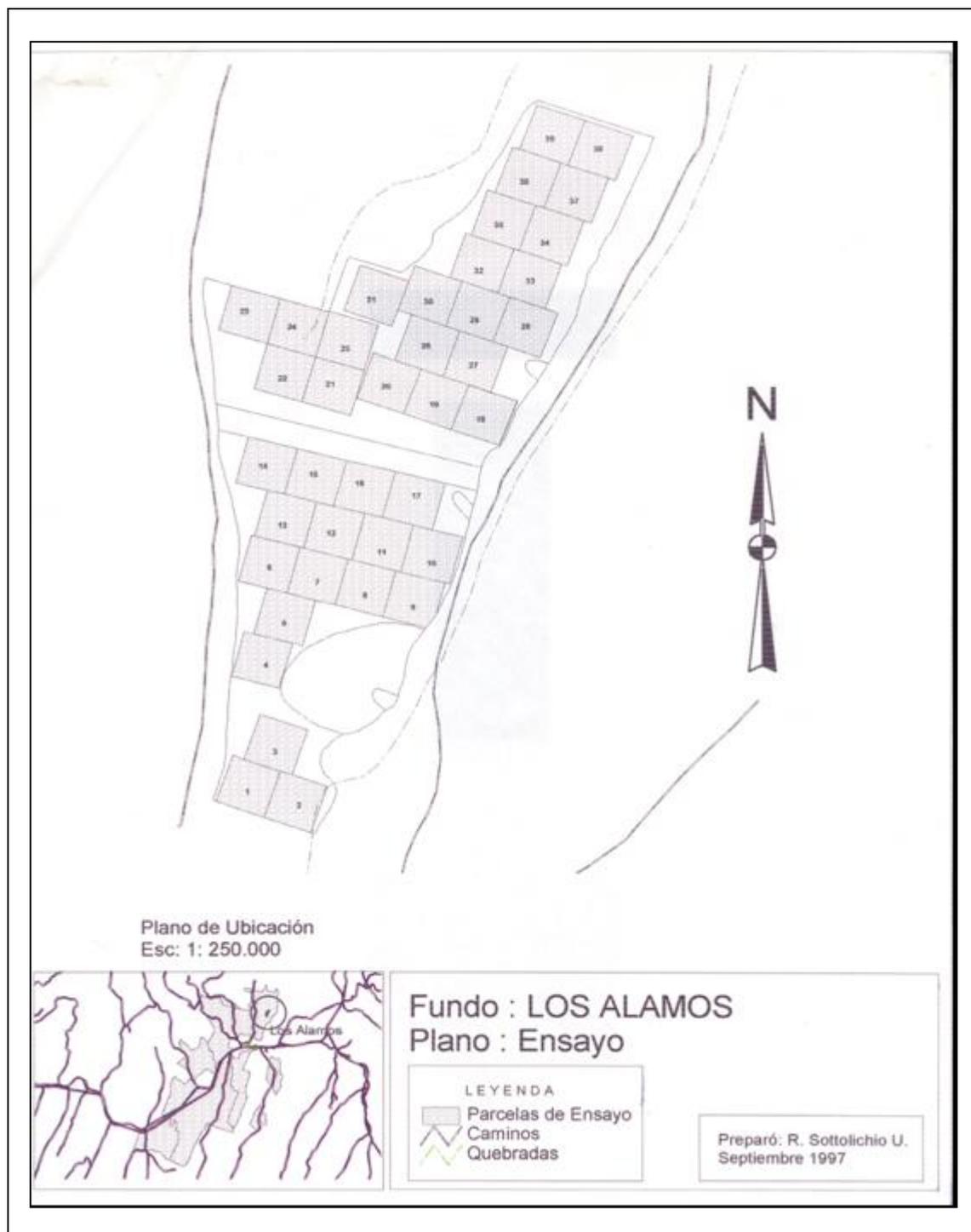


Figura A.1. Plano de ubicación de las parcelas bajo estudio en fundo Los Álamos

ANEXO A.3. DESCRIPCIÓN DE MEDICIONES Y PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE BIOMASA AÉREA.

1. OBTENCIÓN DE DATOS EN TERRENO

Número de muestras: Se voltearon 27 árboles (3 por cada tratamiento).

Selección de los árboles: Que corresponda a la clase de diámetro media de la parcela.

- a) Medición previa al derribo de los árboles: dap con huincha diamétrica. Luego del derribo: altura tocón, altura total hasta el ápice, altura total hasta 3 y 8 cm i.u., diámetro de la base de copa viva, altura de la base de la copa viva y longitud de copa viva.
- b) Cada fuste se trozó en 7 secciones. De la base de cada sección se cortó un disco o rodela de ancho 5 cm.
- c) El largo de copa viva se dividió en tercios. Las ramas de cada tercio fueron pesadas en verde, posteriormente se separan y pesan los componentes de leño y hoja-ramilla. Se entiende por hoja-ramilla toda rama con diámetro inferior a 5 mm, con sus hojas incluidas.
- d) Se obtuvo de cada tercio una muestra de hoja-ramilla, se separó y pesó los componentes de hoja y ramilla.
- e) Las rodela y muestras de leño, hoja y ramillas, debidamente etiquetados, se enviaron a laboratorio.

2. OBTENCIÓN DE DATOS EN LABORATORIO

- a) Las muestras de ramas seleccionadas de cada sección de copa (leño, hoja y ramilla), fueron secadas al horno a 75°C por 48 hrs o peso contante y luego pesadas.
- b) Se separó corteza de leño en las rodela. Posteriormente cada rodela fue sumergida en agua para determinar su volumen por desplazamiento. Tanto leño de rodela como corteza fueron secadas al horno y luego pesadas.

- c) Se obtuvo una muestra de 10 hojas por cada sección de copa y se midió el área foliar con el instrumento Li-cor 3000. Las mediciones se repitieron tres veces para cada hoja.

3. ESTIMACIÓN DE LA MASA SECA FUSTAL

Se determinó la densidad básica de la madera, en base a la relación de masa seca de cada rodela con su volumen verde, obtenido por desplazamiento de agua en un recipiente graduado, según principio de Arquímedes.

$$\delta_b = \frac{M_s}{V_v}$$

Donde:

δ_b : Densidad básica de la madera

M_s : Masa seca de la rodela

V_v : Volumen verde de la rodela

A continuación se obtuvo la masa seca de cada sección fustal a partir del volumen y la densidad básica de cada sección. El volumen total de cada sección fue calculado a partir de la longitud de cada sección fustal y de los diámetros sin corteza de los extremos de cada sección fustal, asumiendo la forma de un paraboloides (fórmula de Smalian) (Hush et al., 1972).

$$V_i = \left[\frac{L_i \times \pi}{40000} \right] \times \left[\frac{(d_{ib}^2 + d_{is}^2)}{2} \right]$$

Donde:

V_i : Volumen de la i-ésima sección fustal

L_i : Largo de la i-ésima sección fustal

d_{ib}^2 : Diámetro sin corteza de la rodela en la base de la i-ésima sección fustal

d_{is}^2 : Diámetro sin corteza de la rodela en el extremo de la i-ésima sección fustal

$$M_i = V_i \times \left[\frac{(\delta_{ib} + \delta_{is})}{2} \right]$$

Donde:

M_i : Masa seca de madera de la sección i

δ_{ib} : Densidad básica de la rodela en la base de la i -ésima sección fustal

δ_{is} : Densidad básica de la rodela en el extremo de la i -ésima sección fustal

En la zona del tocón se asumió $\delta_{ib} = \delta_{is}$; en cuanto al ápice se asumió $\delta_{ib} = \delta_z$, donde:

δ_z = Densidad básica de la rodela extraída a mayor altura del fuste

Luego, se obtuvo la fracción promedio de corteza seca por rodela mediante el promedio ponderado para la sección.

$$Fcs_i = \frac{Msc_{ib} + Msc_{is}}{Msm_{ib} + Msm_{is}}$$

Donde:

Fcs_i : Fracción de corteza seca de la sección i

Msc_{ib} : Masa seca de la corteza en la base de la i -ésima sección fustal

Msc_{is} : Masa seca de la corteza en el extremo de la i -ésima sección fustal

Msm_{ib} : Masa seca de la madera en la base de la i -ésima sección fustal

Msm_{is} : Masa seca de la madera en el extremo de la i -ésima sección fustal

Finalmente, se estimó la masa seca fustal de madera y corteza por árbol, a partir de las fracciones obtenidas

$$MSM = \sum_{i=1}^n Mi$$

$$MSC = \sum_{i=1}^n Fcs_i \times Mi$$

Donde:

MSM : Masa seca total de madera en el árbol

MSC : Masa seca total de corteza en el árbol

n : Número de secciones en el fuste

4. ESTIMACIÓN DE LA MASA SECA DE LA COPA

Para la estimación de masa seca de la copa se obtuvo en primer lugar la fracción promedio de masa seca por componente a nivel de los totales muestras obtenidas de ramas de cada sección en la copa

$$Fls_{mi} = \frac{\sum_{m=1}^k Msl_{mi}}{\sum_{m=1}^k Mvl_{mi}}$$

$$Fhs_{mi} = \frac{\sum_{m=1}^k Msh_{mi}}{\sum_{m=1}^k Mvhr_{mi}}$$

$$Frs_{mi} = \frac{\sum_{m=1}^k Msr_{mi}}{\sum_{m=1}^k Mvhr_{mi}}$$

Donde:

Fls_i : Fracción promedio de leño seco de la sección i de la copa

Fhs_i : Fracción promedio de hojas secas de la sección i de la copa

Frs_i : Fracción promedio de ramillas secas de la sección i de la copa

Msl_{mi} : Masa seca de leño de la muestra de la rama para la sección i de la copa

Mvl_{mi} : Masa verde de leño de la muestra de la rama para sección i de la copa

Msh_{mi} : Masa seca de hojas de la muestra de la rama para sección i de la copa

$Mvhr_{mi}$: Masa verde de hojas + ramillas de la muestra de rama para la sección i de la copa

Msr_{mi} : Masa seca de ramillas de la muestra de la rama para la sección i de la copa

k : Número de muestras de ramas de la sección i de la copa

A continuación se obtuvo la fracción promedio de masa verde por componente a nivel de los totales de las ramas de cada sección en la copa

$$Flv_{ri} = \frac{Mvl_{ri}}{Mvt_{ri}}$$

$$Fhrv_{ri} = \frac{Mvhr_{ri}}{Mvt_{ri}}$$

Donde:

Flv_{ri} : Fracción promedio de leño verde de las ramas de la sección i de la copa

$Fhrv_{ri}$: Fracción promedio de hoja + ramillas verdes de las ramas de la sección i de la copa

Mvl_{ri} : Masa verde de leño de las ramas de la sección i de la copa

Mvt_{ri} : Masa verde total (hoja + ramilla + leño) de las ramas de la sección i de la copa

$Mvhr_{ri}$: Masa verde de hoja + ramilla de las ramas de la sección i de la copa

Finalmente, se determinó la masa seca de los componentes follaje de la forma:

$$MSR = \sum_{i=1}^n Frs_{mi} \times Fhrv_{ri} \times Mf_i$$

$$MSH = \sum_{i=1}^n Fhs_{mi} \times Fhrv_{ri} \times Mf_i$$

$$MSL = \sum_{i=1}^n Fls_{mi} \times Flv_{mi} \times Mf_i$$

$$MSF = MSR + MSH + MSL$$

Donde:

MSH : Masa seca de Hojas de la copa del árbol

Mf_i : Masa fresca total de la sección i del árbol

MSR : Masa seca de ramillas de la copa del árbol

MSL : Masa seca de leño de la copa del árbol

MSF : Masa seca total del follaje

n : Número de secciones de la copa

ANEXO A.4. DISTRIBUCIÓN DEL PESO SECO DE LOS COMPONENTES DE LOS ÁRBOLES

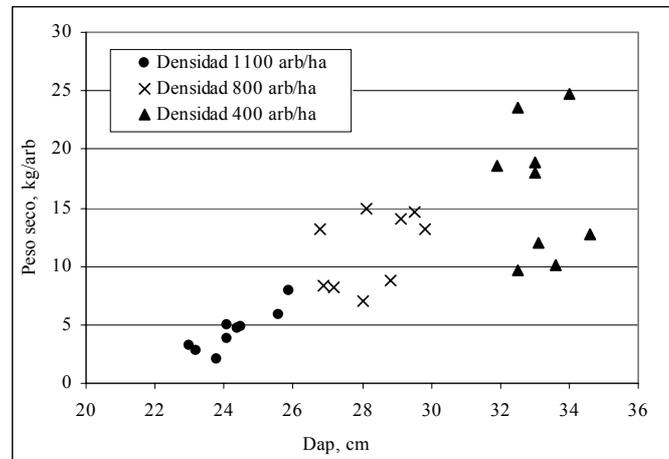


Figura A. 2. Distribución del peso seco de la hoja según nivel de densidad y dap

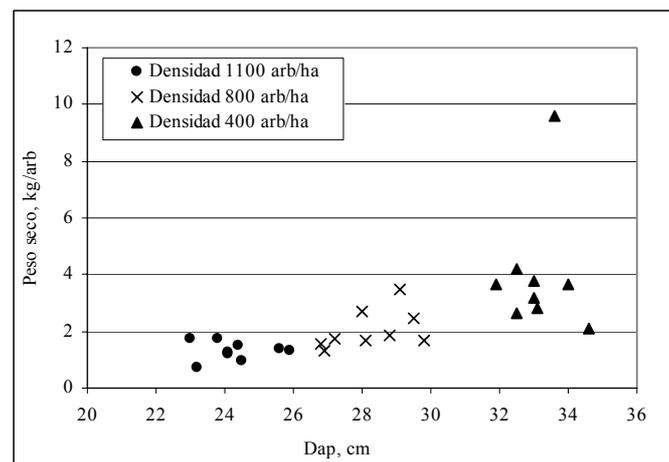


Figura A. 3. Distribución del peso seco de la ramilla según nivel de densidad y dap

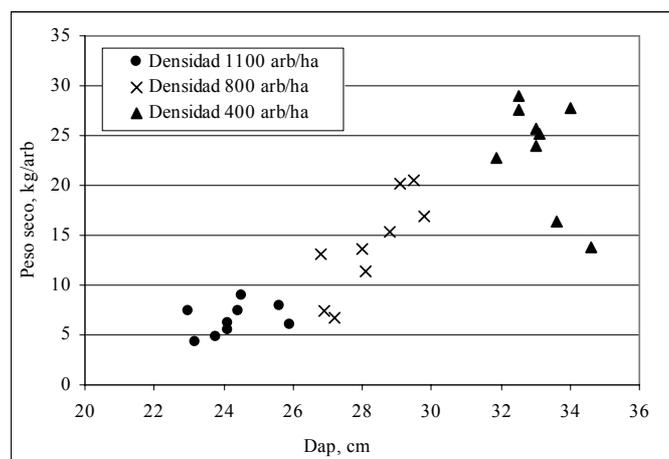


Figura A. 4. Distribución del peso seco de la rama según nivel de densidad y dap

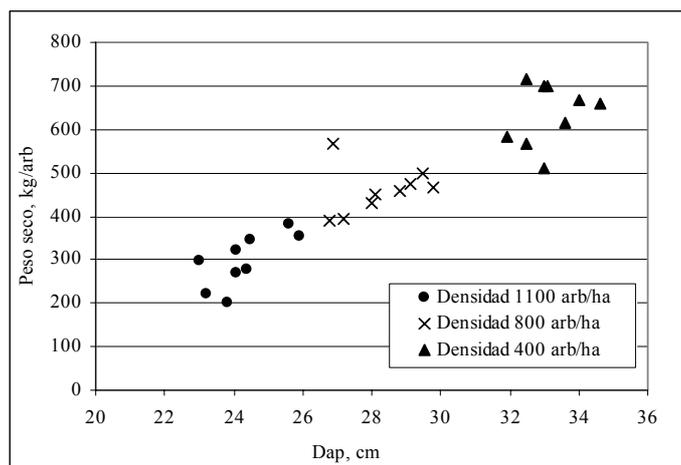


Figura A. 5. Distribución del peso seco del fuste según nivel de densidad y dap

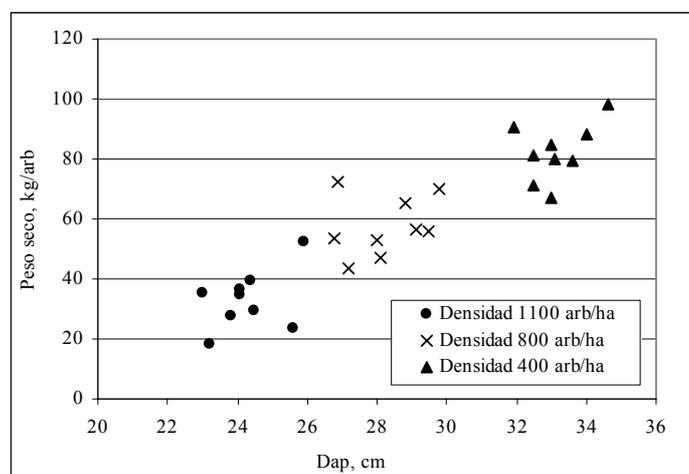


Figura A. 6. Distribución del peso seco de la corteza según nivel de densidad y dap

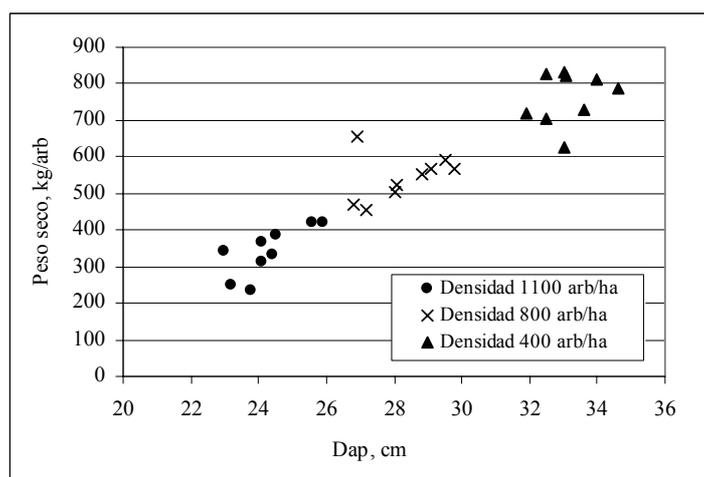


Figura A. 7. Distribución del peso seco total del árbol según nivel de densidad y dap