



*Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados*



**EFECTOS DE LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN
SOBRE LA BIOMASA AÉREA Y LAS PROPIEDADES
FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Grevillea
robusta* A. Cunningham**

Barth Sara Regina

**Tesis para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

Córdoba, 2016

**EFFECTOS DE LA DENSIDAD DE PLANTACIÓN
SOBRE LA BIOMASA AÉREA Y LAS PROPIEDADES
FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Grevillea
robusta* A. Cunningham**

Barth Sara Regina

Comisión Asesora de Tesis

Directora: Dra. Ana María Giménez

Co - Directora: Dra. Marisa Jacqueline Joseau

Asesora: Dra. María Elena Gauchat

Tribunal Examinador de Tesis

Dr. Antonio de la Casa

Dra. Juana Graciela Moglia

Dra. María Elena Gauchat

Presentación Formal Académica

Septiembre de 2016

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela para Graduados de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba.

A la Unidad para el Cambio Rural dependiente del Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por el financiamiento de mi formación Doctoral tanto en la fase de cursado académico como de Investigación.

A la empresa Garruchos Forestal S. A. perteneciente al grupo POMERA, quienes facilitaron gratuitamente el material de estudio proveniente de un ensayo de densidad de plantación de *Grevillea robusta* instalado en su propiedad en lo que anteriormente fuera la empresa Danzer Forestaciones S. A.

Al Centro Tecnológico de la madera, en la persona de su encargado de aserradero Sr. Adrián Bulfe y su personal, quienes realizaron el aserrado de la madera para los distintos ensayos realizados.

A mis asesoras de Tesis Dra. Ana María Giménez, Dra. Marisa Jacqueline Joseau y Dra. María Elena Gauchat por su colaboración y amistad.

Al M. Sc. Ing. Ftal. Hugo Enrique Fassola, quien instaló el ensayo inicial 18 años antes, por ser en estos años como Jefe del Grupo Forestal de la EEA Montecarlo de INTA quien nos animó y apoyó en nuestro camino hacia la superación permanente.

A mis compañeros del área Forestal de la EEA Montecarlo de INTA, M. Sc. Ing. Ftal Ernesto Crechi, M. Sc. Ing. Ftal. Aldo Esteban Keller, M. Sc. Ing. Ftal. Ángela Winck y M. Sc. Ing. Ftal. Fidelina Silva con quienes junto al M. Cs. Ing. Hugo Fassola tuve oportunidad de discutir los resultados obtenidos y sus aportes resultaron de utilidad en la realización del presente trabajo.

Al personal de campo y laboratorio de la EEA Montecarlo INTA, en particular a: Otto Eduardo Knebel, Roberto Oscar Kobs, Lucas Giménez, Diego Rolando Aquino, Delia Sosa, Jorge Vicentini, Tomás Häberle y Gabriela Faraldo, quienes colaboraron en el arduo trabajo de campo, recolección de biomasa de sotobosque, apeo, desarme, aserrado, elaboración de

probetas, ensayos de propiedades físico-mecánicas, tipificación de madera y demás tareas de laboratorio y gabinete.

A colegas de la Facultad de Ciencias Forestales, M. Cs. Ing. Ftal. Teresa Suirezs, Ing. Ftal. Daniel Videla, M. Cs. Ing. Ftal. Beatriz Eibl, M. Cs. Ing. Ftal. Alicia Bohren, Ing. Ftal. Angélica Aguilera, Ing. Ftal. Rosana Manuela Méndez y la Señorita Adelaida Bragagnolo quienes colaboraron en ensayos de propiedades físicas mediante máquina universal de ensayos y mediciones anatómicas. Como así también cubriendo mis horas de ausencia en la actividad docente frente al aula.

Al M. Sc. Ing. Ftal. Norberto Pahr y el M. Sc. Ing. Ftal. Martín Pinazo por sus aportes a la confusión general que me hiciera buscar nuevos horizontes y por compartir el día a día en la vida laboral.

A la M. Sc. Ing. Agr. Paola González, la Licenciada en Genética Pamela Alarcón y el Ing. Ftal. Cristian Rotundo por colaborar en mis tareas de investigación ajenas a la presente Tesis, lo que me permitió mayor tiempo de dedicación a la misma.

A todos los compañeros de trabajo de la EEA Montecarlo a quienes no mencionara en este agradecimiento por cuestiones de espacio pero que día a día brindan su amistad y colaboración en tareas administrativas y técnicas, conformando la gran familia INTA al servicio del productor de la zona de influencia de nuestra Estación Experimental Agropecuaria.

Finalmente, a mi familia por el apoyo recibido a lo largo de mis años de formación académica.

DEDICATORIA

A mis padres Natalia y Pablo y mi hermano Pablo Daniel por su apoyo, compañía, paciencia y amor, sin lo cual me hubiera sido imposible culminar esta etapa.

A mis sobrinos Matías y Santiago por ser el motor que mueve mi voluntad para alcanzar los objetivos que me fije en la vida.

A Uds. dedico el fruto de este trabajo.

*Al ampliar el campo del conocimiento no
hacemos sino aumentar el horizonte de
nuestra ignorancia...*

*Henry Müller
1929-1955*

*Lo importante es no dejar de hacerse
preguntas...
La mente es como un paracaídas, sólo
funciona si se abre...*

*En los momentos de crisis, solo la
imaginación es más importante que el
conocimiento...*

*Albert Einstein
1879-1955*

RESUMEN

Considerando la densidad de plantación como uno de los factores condicionantes de la producción forestal y teniendo en cuenta que puede modificar las tasas de crecimiento, el presente estudio tuvo como objetivo principal evaluar su efecto en distintas variables de interés ecológico y productivo. Se observó su influencia sobre la acumulación de biomasa, variables dendrométricas, anatomía, propiedades físico-mecánicas y producción de madera de calidad. Las evaluaciones fueron realizadas sobre muestras provenientes de un ensayo de *Grevillea robusta* de 18 años de edad, con mediciones periódicas y muestreo destructivo final. Se analizó la biomasa aérea de los distintos compartimentos (hojas, ramas, fuste y corteza). Se evaluaron las variables dendrométricas dap, altura (h), área basal (G), volumen individual y volumen por hectárea (Vcc/ha). Se estudiaron además las variables longitud y diámetro de fibras y vasos, densidad básica, estabilidad dimensional de la madera, dureza Janka, MOR y MOE. Se evaluaron las correlaciones entre estas variables respuesta y la densidad de plantación. La acumulación de biomasa y las variables dendrométricas presentaron alta correlación con la densidad de plantación. A nivel individual, menores densidades de plantación dieron lugar a una mayor acumulación de biomasa y favorecieron el crecimiento en diámetro, área basal y volumen. A nivel de rodal, mayores densidades de plantación fueron responsables de mayor acumulación de biomasa y mayor producción en G y Vcc/ha. La densidad básica de la madera (db) no fue influenciada por el tratamiento, con excepción de aquel con mayor densidad de plantación que presentó una db promedio superior ($0,52 \text{ g/cm}^3$) a la media de los demás tratamientos ($0,48 \text{ g/cm}^3$). Un comportamiento similar tuvieron la contracción, el hinchamiento y la anisotropía. La longitud de fibra fue mayor en el tratamiento con mayor densidad de plantación, no detectándose diferencias entre los demás tratamientos. Las propiedades mecánicas presentaron correlación con la densidad básica de la madera, debido a ello, la dureza Janka, el MOE y el MOR tuvieron un comportamiento semejante al de la densidad básica. A nivel individual, las menores densidades de plantación tuvieron un mayor rendimiento en madera de mejores calidades. A nivel de rodal, las mayores densidades de plantación concentraron el mayor volumen de madera de la mejor calidad pero de menores dimensiones.

Palabras clave: manejo forestal, espaciamiento, biomasa, dendrometría, propiedades físico-mecánicas, calidad de madera.

SUMMARY

Considering the planting density as one of the conditioning factors for forest production and taking into account that it can modify the growth rates the main objective of the present study was to evaluate its effect on different ecological and productive variables of interest. Its influence on biomass accumulation, dendrometric variables, anatomy, physical and mechanical properties and quality wood production was also observed. Evaluations were made on samples coming from a trial of 18 years-old *Grevillea robusta* plantation with periodical measurements and final destructive sampling. Aboveground biomass of different compartments (leaves, branches, stem and bark) was analyzed. Dendrometric variables such as dap, height (h), basal area (G), individual volume and volume per hectare (Vcc / ha) was evaluated. In addition, the length and diameter of fibers and vessels, specific gravity, and dimensional stability of wood, Janka hardness, MOR and MOE were studied. The correlations between these response variables and the planting density were evaluated. Biomass accumulation and dendrometric variables showed high correlation with the planting density. Biomass accumulation and dendrometric variables presented high correlation with the density of planting. Individually, lower planting densities resulted in a greater accumulation of biomass and favored diameter, basal area and volume growth. At stand level, higher plant densities were responsible for increased biomass accumulation and higher production in G and Vcc/ha. The basic wood density (db) was not influenced by the treatment, except for higher planting density which presented an average density (0,52 g/cm³) higher than the average of the other treatments (0,48 g/cm³). They had similar shrinkage, swelling and anisotropy behavior. The fiber length was longer in the treatment with higher planting densities being not observed differences between the other treatments. The mechanical properties showed correlation with the basic wood density, as a result, the Janka hardness, the MOE and MOR had a similar behavior as the basic density. At tree level, lower planting densities had higher performance in the highest quality wood. At stand level, the highest planting densities accounted for a larger wood volume of the highest quality but smaller dimensions.

Key words: forest management, spacing, biomass, dendrometry, physical and mechanical properties, wood quality.

RESUMO

Considerando a densidade de plantação como um dos fatores condicionantes da produção florestal e tomando em conta que ela pode modificar a taxa de crescimento, o presente estudo teve como objetivo principal avaliar o efeito de quatro densidades de plantio em diferentes variáveis de interesse ecológico e produtivo. Observou-se o efeito sobre o acúmulo de biomassa, variáveis dendrométricas, anatomia, propriedades físico-mecânicas e produção de madeira de qualidade. As avaliações foram realizadas sobre um ensaio de *Grevillea robusta* de 18 anos de idade, com medições periódicas e amostragem destrutiva final. Avaliou-se a biomassa aérea dos diferentes componentes aéreos (folhas, galhos, fuste e casca). Avaliaram-se as variáveis dendrométricas dap, altura (h), área basal (G), volume individual e volume por hectare (vcc/ha). Estudou-se longitude e diâmetro de fibras e vasos, densidade básica e estabilidade dimensional da madeira, além da dureza Janka, MOR e MOE. Avaliaram-se as correlações entre as variáveis mencionadas e a densidade do plantio. As variáveis de acumulação de biomassa e dendrométricas apresentaram alta correlação com a densidade do plantio. No nível individual menores densidades de plantio deram lugar a um maior acúmulo de biomassa e beneficiaram o crescimento em diâmetro, área basal e volume. Ao nível de massa florestal, maiores densidades de plantio foram responsáveis do maior acúmulo de biomassa e maior produção na G e Vcc/ha. A densidade básica da madeira (db) não foi influenciada pelo tratamento, com exceção da maior competência entre indivíduos que apresento uma densidade média superior ($0,52 \text{ g.cm}^{-3}$) à media dos demais tratamentos ($0,48 \text{ g.cm}^{-3}$). Similar comportamento tiveram a contração e o enchimento e a anisotropia. O comprimento da fibra foi maior a uma maior densidade de plantio, não se detectaram diferenças entre os outros tratamentos. Ao estar as propriedades físico-mecânicas correlacionadas com a densidade básica da madeira, a dureza Janka, o MOR e o MOE, teve um comportamento semelhante a esta. Ao nível de arvore as menores densidades de plantio tiveram um maior rendimento volumétrico na madeira das melhores qualidades. Ao nível de massa florestal o numero de indivíduos fez que as maiores densidades de plantio concentrassem o maior volume de madeira da melhor qualidade, porém de menores dimensões.

Palavras chave: manejo florestal, espaçamento, biomassa, dendrometria, propriedades físico-mecânicas, qualidade de madeira.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Lista de tablas.....	XIII
Lista de figuras.....	XV
Lista de abreviaturas y símbolos.....	XVIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	21
CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE.....	21
ENFOQUE DEL ESTUDIO.....	22
HIPÓTESIS.....	24
OBJETIVOS.....	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	26
CAPÍTULO 2. COMPARTIMENTALIZACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA.....	30
INTRODUCCIÓN.....	30
MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	44
CAPÍTULO 3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE BIOMASA.....	49
INTRODUCCIÓN.....	49
MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	65
CAPÍTULO 4. COMPORTAMIENTO DENDROMÉTRICO.....	69
INTRODUCCIÓN.....	69

MATERIALES Y MÉTODOS.....	70
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
Altura.....	72
Diámetro.....	74
Distribución diamétrica.....	76
Área basal.....	78
Volumen individual.....	79
Volumen por hectárea.....	80
Funciones de producción.....	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA CITADA	85
CAPÍTULO 5. PROPIEDADES ANATÓMICAS Y FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA.....	89
INTRODUCCIÓN.....	89
MATERIALES Y MÉTODOS.....	91
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	96
Proporción de duramen según densidad de plantación.....	96
Caracterización del leño según densidad de plantación. Fibras y vasos.....	97
Densidad básica de la madera.....	104
Contracción, hinchamiento y anisotropía.....	106
Dureza Janka.....	108
Módulos de elasticidad y de rotura.....	109
Correlación entre densidad inicial de plantación y parámetros de caracterización anatómica y propiedades físico-mecánicas de la madera.....	111
CONCLUSIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	115
CAPÍTULO 6. ASERRADO Y CLASIFICACIÓN DE LA MADERA SEGÚN GRADO DE CALIDAD.....	120
INTRODUCCION.....	120
MATERIALES Y METODOS.....	122
RESULTADOS Y DISCUSION.....	125
Rendimiento en aserrado y tipificación según apariencia.....	125
CONCLUSIONES.....	134

BIBLIOGRAFÍA CITADA	135
CAPÍTULO 7. DISCUSIONES GENERALES	138
BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	144
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES	148

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Espaciamiento y densidades iniciales de plantación del ensayo de <i>Grevillea robusta</i> instalado en Posadas, Misiones, Argentina	31
Tabla 2.2. Densidad aparente y contenido de nutrientes del suelo a distintas profundidades	33
Tabla 2.3. Biomasa aérea ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) acumulada en el sotobosque de <i>Grevillea robusta</i> en función de la densidad de plantación	37
Tabla 2.4. Variables dendrométricas del rodal de <i>Grevillea robusta</i> . Edad 18 años	38
Tabla 2.5. Biomasa aérea individual (kg) de <i>Grevillea robusta</i> a 18 años de edad	39
Tabla 2.6. Biomasa arbórea a nivel de rodal en <i>Grevillea robusta</i> a 18 años de edad ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	41
Tabla 3.1. Modelos evaluados para estimación de los distintos componentes de biomasa	52
Tabla 3.2. Valores promedio, mínimos, máximos, de diámetro a altura de pecho (dap) y altura total (h) observados	52
Tabla 3.3. Estadísticas descriptivas de los componentes de biomasa (kg)	53
Tabla 3.4. Valores estimados de los distintos parámetros de los modelos propuestos para estimación de biomasa y sus coeficientes de ajuste	57
Tabla 3.5. Valores estimados de los distintos parámetros para el mejor modelo seleccionado bajo métodos OLS y SUR en cada compartimento de biomasa aérea	59
Tabla 3.6. Coeficientes de discrepancia logarítmica de modelos de predicción de biomasa por compartimento	60
Tabla 3.7. Valores estimados para el modelo que utilizó diámetro a altura de pecho (1,30 m) como única variable predictora	62
Tabla 3.8. Error de estimación calculado en base a validación contra muestra independiente de modelos con una y dos variables predictoras. Valor expresado en %	64
Tabla 4.1. Coeficientes y estadísticos de las funciones para altura según el modelo de Chapman-Richards	74

Tabla 4.2.	Coeficientes y estadísticos de las funciones para diámetro a altura de pecho (dap) según el modelo de Chapman-Richards	76
Tabla 4.3.	Coeficientes y estadísticos de las funciones para área basal (G) según el modelo de Chapman-Richards	79
Tabla 4.4.	Coeficientes y estadísticos de las funciones para volumen total con corteza según el modelo de Chapman-Richards	82
Tabla 4.5.	Índice de área foliar según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	82
Tabla 5.1.	Correlación entre parámetros evaluados	112
Tabla 6.1.	Ahusamiento de la troza (cm/m)	126
Tabla 6.2.	Rendimiento por grado de calidad según densidad de plantación. Valores expresados en porcentaje	126
Tabla 6.3.	Rendimiento de aserrado en troza 1 por grado de calidad, según densidad de plantación. Valores expresados en porcentaje	127
Tabla 6.4.	Rendimiento de aserrado en troza 2 según densidad de plantación. Valores expresados en porcentaje según grado de calidad	128
Tabla 6.5.	Distribución diamétrica porcentual según densidad de plantación	129

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1.	<i>Grevillea robusta</i> . Detalle de: a) Flores, b) Frutos, c) Hojas y d) Madera	22
Figura 2.1.	Localización del área de estudio. Referencias: A, Distrito de las Selvas Mixtas; B, Distrito de los Campos	32
Figura 2.2.	Muestreo de sotobosque en parcelas de <i>Grevillea robusta</i>	34
Figura 2.3.	Apeo y desarme de individuos de <i>Grevillea robusta</i> . a, medición de fuste; b, trozado de copa; c, clasificación de ramas; d y e, deshoje	35
Figura 2.4.	Distribución representativa de los distintos componentes de la biomasa aérea de <i>Grevillea robusta</i> según densidad de plantación	42
Figura 3.1.	Relación entre el diámetro a la altura del pecho y altura total con la biomasa foliar, biomasa de ramas, biomasa de corteza, biomasa de fuste y biomasa total	56
Figura 3.2.	Valores de biomasa observados versus predichos utilizando las variables predictoras diámetro a altura de pecho (1,30 m) y altura (h)	61
Figura 3.3.	Valores de biomasa observados versus predichos en base al modelo de mejor ajuste. Variable predictora diámetro a altura de pecho (dap)	63
Figura 4.1.	Altura dominante según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	72
Figura 4.2.	Altura media según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	73
Figura 4.3.	Evolución de altura total según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards)	74
Figura 4.4.	Diámetro a altura de pecho (dap) según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	75
Figura 4.5.	Evolución del diámetro a la altura de pecho (dap) según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: modelo de Chapman-Richards)	76
Figura 4.6.	Distribución de probabilidades acumuladas de diámetro a altura de pecho (dap) según modelo Weibull para <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad en función a la densidad de plantación	77
Figura 4.7.	Frecuencia relativa porcentual según clase diamétrica para <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	77
Figura 4.8.	Área basal (G) según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	78

Figura 4.9.	Evolución del área basal (G) según edad y densidad de plantación. Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards)	79
Figura 4.10.	Volumen individual con corteza según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	80
Figura 4.11.	Volumen con corteza por hectárea según densidad de plantación en <i>Grevillea robusta</i> de 18 años de edad	81
Figura 4.12.	Evolución del volumen total con corteza según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards)	81
Figura 4.13	Valores observados <i>versus</i> predichos, modelos de producción de <i>Grevillea robusta</i> . a: área basal presente, b: área basal futura, c: volumen presente, d: volumen futuro	84
Figura 5.1.	Localización probetas de posición interna (I), color ocre; probetas de posición externa (E), color marrón	92
Figura 5.2.	Ubicación probetas para medición de densidad básica de la madera	93
Figura 5.3	Saturación de probetas para evaluación de hinchamiento	93
Figura 5.4.	Fotografía de una probeta para evaluación de dureza Janka	94
Figura 5.5.	Fotografía que muestra el procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad dinámico determinado a través de método no destructivo (Metriguard E 340)	95
Figura 5.6.	Fotografía que muestra la determinación del módulo de elasticidad mediante el uso de una máquina universal de ensayos	96
Figura 5.7	Proporción de duramen según densidad inicial de plantación	97
Figura 5.8	Longitud de fibra según densidad inicial de plantación	98
Figura 5.9.	Longitud de fibra según posición respecto a la médula	99
Figura 5.10.	Diámetro de fibra según densidad inicial de plantación	100
Figura 5.11.	Diámetro de fibra según posición radial desde la médula	100
Figura 5.12.	Longitud de vasos según densidad de plantación	101
Figura 5.13.	Longitud de vasos según posición en sentido radial	102
Figura 5.14.	Diámetro de vasos en función a la densidad inicial de plantación	102
Figura 5.15.	Diámetro de vasos en función a la posición en sentido radial.	103
Figura 5.16.	Densidad básica de la madera de <i>Grevillea robusta</i> en función a la densidad inicial de plantación (número de árboles por hectárea)	105
Figura 5.17.	Densidad básica de la madera de <i>Grevillea robusta</i> en función a la distancia radial desde la médula expresada como posiciones A (interna, cercana a la médula), B y C (externas)	105
Figura 5.18.	Contracción e hinchamiento volumétricos totales en madera de <i>Grevillea robusta</i> a diferentes densidades de plantación	107
Figura 5.19.	Coefficiente de anisotropía según densidad inicial de plantación	107

Figura 5.20.	Dureza Janka según densidad inicial de plantación. a) sentido longitudinal o axial, b) sentido radial, c) sentido tangencial	109
Figura 5.21.	Módulo de elasticidad dinámico según densidad de inicial de plantación. Valor expresado en Gigapascales	110
Figura 5.22.	Módulo de rotura según densidad de plantación expresado en kg/cm ²	111
Figura 5.23.	Relación peso específico de la madera verde y luego de estacionada a condiciones ambientales. Fuente: Bolza y Kloot (1963)	113
Figura 6.1.	Fotografía mostrando detalle de: a) trozas aserradas, b) piezas aserradas con marcación de trazabilidad	123
Figura 6.2.	Tablas según grado de calidad. a y b, FAS; c, N1; d, e y f, N2	124
Figura 6.3.	Rendimiento de aserrado según densidad de plantación a) rendimiento general por árbol, b) rendimiento de la troza 1 (basal), c) rendimiento de la troza 2	125
Figura 6.4.	Rendimiento en aserrado según posición sociológica de los individuos	128
Figura 6.5.	Rendimiento en aserrado según posición sociológica y grado de calidad evaluado por su grado de apariencia	129
Figura 6.6.	Rendimiento en madera aserrada según posición sociológica y densidad de plantación	130
Figura 6.7.	Rendimiento volumétrico medio de árboles individuales según densidad de plantación	131
Figura 6.8.	Rendimiento volumétrico medio de madera aserrada de árboles individuales según calidad y densidad de plantación	131
Figura 6.9.	Rendimiento volumétrico medio de madera aserrada del rodal según calidad y densidad de plantación	132
Figura 6.10.	Proporción de tablas a obtener según ancho y densidad de plantación	132

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

dap c. c.: diámetro a altura de pecho (1,30 metros), con corteza

h: altura total

G: área basal (metros cuadrados)

Vcc/ha: volumen con corteza por hectárea

MOE: módulo de elasticidad

MOR: módulo de rotura

g/cm³: gramos por centímetro cúbico

mm: milímetro

Cfa: Clima subtropical sin estación seca (clasificación climática de Köppen)

°C: grados centígrados

pH: potencial hidrógeno, medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H₃O]⁺ presentes en determinadas disoluciones.

N total: Nitrógeno total

P: Fósforo

K: Potasio

Ca: Calcio

Mg: Magnesio

Mg.m⁻³: Megagramo por metro cúbico, es igual a tonelada por metro cúbico o 1000 kilogramos por metro cúbico.

Kg.ha⁻¹: kilogramo por hectárea

g: gramo

DGC: Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves para comparación de medias. Utiliza la técnica multivariada del análisis de conglomerados sobre una matriz de distancia entre medias muestrales de tratamiento.

a/ha: árboles por hectárea

cm: centímetro

E: error

R² ajustado: coeficiente de determinación ajustado

MSE: error estándar

kg: kilogramo

OLS: mínimos cuadrados ordinarios

SUR: regresiones aparentemente no relacionadas

Vcc₁: volumen presente con corteza

Vcc₂: volumen futuro con corteza

ln: logaritmo natural

LI: límite inferior

LS: límite superior

m²: metros cuadrados

m³: metros cúbicos

ml: mililitros

PD: proporción de duramen (%)

E: porción externa de la troza, alejada de la médula

I: sección interna de la troza cercana a la médula

LF: longitud de fibra (mm)

DF: diámetro de fibra (micra)

LV: longitud de vaso (mm)

DV: diámetro de vaso (micra)

db: densidad básica de la madera

Pa: Peso anhidro de la probeta de madera

Vh: Volumen de la probeta de madera en estado saturado de agua (contenido de humedad máximo)

CT: contracción total expresada en porcentaje

Ls: longitud saturada (mm)

Lo: longitud anhidra (mm)

H: hinchamiento máximo, enunciado en porcentaje

CA: coeficiente de anisotropía

V: volumen de la troza (m^3)

d₁: diámetro con corteza (cm) en punta gruesa de la troza (cm)

d₂: diámetro con corteza en punta fina de la troza (cm)

L: longitud de la troza (m)

R: rendimiento en madera aserrada (%)

D: individuo dominante (diámetro superior a 30 cm)

CD: individuo codominante (diámetro entre 20 y 30 cm)

S: individuo suprimido (diámetro menor a 20 cm)

v_i = volumen de la tabla proveniente de la troza i (m^3)

v₁: volumen total sin corteza de la troza que originó las tablas (m^3)

ahus: ahusamiento

MC %: madera libre de defectos (%)

FAS: tablas selectas sin defectos, adecuadas para molduras de mayor longitud con destino a carpinterías para elaboración de marcos de puertas, revestimientos interiores y muebles

N1: piezas sin defectos visuales pero de menor longitud, son tablas aptas para partes de muebles como armarios de cocina o bibliotecas

N2: tablas sin defectos visuales, con longitudes no mayores a 60 cm

N2 nc: tablas que no clasifican por tener un ancho menor a tres pulgadas (7,62 cm)

INTRODUCCIÓN GENERAL

CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

Grevillea robusta debe su nombre científico al botánico inglés Charles Greville (1749-1809). Dentro de su género es la especie de mayor porte. Es conocida como grevillea, roble sedoso, roble australiano y pino de oro. Es originaria de Australia, donde crece en pequeños rodales de los estados de Queensland y Nueva Gales del Sur, desde los 25° 50' S hasta los 30° 10' S, en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1100 m. En esa zona las lluvias van desde 720 a 1710 mm anuales y la temperatura media anual oscila de 14 a 20 °C (Swain, 1928; Boland, 1984; Harwood y Getahun, 1990; Harwood, 1992). En su hábitat natural alcanza alturas de 20 a 24 metros, pudiendo llegar a 40 m de altitud con diámetros entre 40 y 50 cm. Presenta una copa de follaje relativamente denso, las hojas son bipinnadas, de 15-25 cm de longitud, con segmentos lanceolados de color verde oscuro en el haz y plateado-tomentoso por el envés. El pecíolo también es tomentoso. Las flores crecen en racimos orientados hacia arriba. Son de color dorado y de 7-10 cm de longitud, filamentosas. El fruto es una cápsula aplanada, coriácea, dehiscente, negruzca, con una punta curvada en su extremo (Figura 1.1) y contiene 1-2 semillas aladas. La madera del roble australiano se emplea para fabricar botes e instrumentos musicales y en ebanistería, tanto de muebles como cerramientos interiores y exteriores, ya que es muy resistente a la humedad. Fue introducida con éxito en numerosos países como Brasil, Argentina, India, Ruanda y Kenia por su potencial de crecimiento y usos: sombreamiento de cultivos agrícolas y pasturas así como leña y madera (Gonçalves Martins y Neves, 2004; Barth *et al.*, 2015). Respecto a su cultivo, en su etapa juvenil tolera condiciones algo sombreadas, pero prefiere pleno sol. Se adapta a una gran diversidad de climas y suelos. *Grevillea robusta* se desarrolla mejor en suelos con pH ácido o neutro. Su parte subterránea crece con vigor en suelos de textura arenosa, franca o arcillosa, éstos se pueden mantener generalmente secos o húmedos. Soporta bien la sequía y no tolera los encharcamientos. Es

una especie medianamente exigente en cuanto a necesidades lumínicas, pudiendo implantarse indistintamente con semisombra o a cielo abierto con exposición solar directa.



Figura 1.1. *Grevillea robusta*. Detalle de: a) Flores, b) Frutos, c) Hojas y d) Madera

ENFOQUE DEL ESTUDIO

El largo plazo de la actividad forestal incrementa la complejidad en la toma de decisiones de manejo de la masa arbórea. Surge así, la necesidad de conocer como modificar la producción física que provee la plantación al mismo tiempo que se incrementa su valor comercial.

Producir madera de calidad en un marco de Manejo Forestal Sustentable es de importancia estratégica para el sector foresto-industrial. En consonancia con ello, se busca incorporar nuevas alternativas de cultivo a través de especies no tradicionales pero con potencialidad en la región. La elección de *Grevillea robusta* como una alternativa productiva por parte de las empresas se debe a su crecimiento relativamente rápido (en comparación al de otras especies), la adaptación a condiciones edafo-climáticas y a la presión social y ambiental para el cese del aprovechamiento del bosque nativo (Fassola *et al.*, 2004; Esquivel, *et al.*, 2010).

El conocimiento del desempeño *Grevillea robusta* en cuanto a acumulación de biomasa y su relación con el crecimiento y la calidad de madera obtenida, es una herramienta de importancia para la toma de decisiones.

El crecimiento de la masa forestal se relaciona a factores como la acumulación de biomasa en el árbol (Shinozaki *et al.*, 1964a, 1964b). La biomasa de un individuo puede ser caracterizada a través de funciones alométricas, conociendo la relación existente entre la biomasa aérea y/o el tejido conductivo y variables tradicionalmente empleadas como diámetro a altura de pecho, diámetro en base de copa verde, altura total y altura de base de copa verde, entre otras (Valentine, 1985; Makela, 1986; Albaugh, *et al.*, 2009; Teobaldelli *et al.*, 2009; Forrester *et al.*, 2010).

La arquitectura del individuo define el diseño estructural y las relaciones entre los órganos y otras unidades estructurales a diferentes niveles jerárquicos dentro del árbol (Chiba, 1997; Achim *et al.*, 2006; Beailieu *et al.*, 2011, Wang *et al.*, 2011). A su vez, la arquitectura de copa, vinculada al manejo forestal (densidad de plantación, oportunidad e intensidad de podas y/o raleos), influye en la calidad de la madera a obtener dada sus características físicas (densidad básica, coeficientes de retractibilidad, dureza, módulo de elasticidad, entre otras) (Muñiz Bolzon, 1993; Briggs *et al.*, 2007; Hein *et al.*, 2007; Hein & Spiecker, 2007; Hein *et al.*, 2008; Carlson *et al.*, 2009; Kint *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2011; Subedi *et al.*, 2012).

La nueva tendencia en modelos de predicción de producción forestal es incorporar en ellos variables fisiológicas. Esto requiere estudiar procesos y acumulación de biomasa y crecimiento en cada uno de los compartimentos del árbol (Korol *et al.*, 1995; Landsberg y Waring, 1997; Wang y Jarvis, 1990; Cournède *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2008; Vos *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011; Diao *et al.*, 2012; André *et al.*, 2010). Estos modelos implican la estimación de biomasa de individuos y/o parcelas a partir de relaciones alométricas en función a dimensiones habitualmente consideradas como diámetro a altura de pecho (dap), altura total, área transversal de base de copa viva, entre otras.

Dado los conocimientos existentes, ningún ordenador forestal discutiría que espaciamientos mayores favorecen una mayor dimensión de las trozas maderables. No obstante, aún son desconocidos los efectos que los espaciamientos tienen sobre la calidad de la madera de *Grevillea robusta* (Fassola *et al.*, 2004).

Las propiedades internas de la madera tales como la densidad básica y la morfología de fibras y vasos tienen una alta influencia en la calidad de la madera (Zobel y van

Buijtenen, 1989; Zobel y Jett, 1995; Gerendiain *et al.*, 2008). La densidad básica de la madera tiene influencia directa en propiedades como resistencia, trabajabilidad, grado de conversión y aptitud de la madera obtenida. Por este motivo es una de las propiedades más estudiadas (Macdonald y Humbert, 2002; Lobão *et al.*, 2004). La aptitud maderera depende de las características requeridas para cada uso en particular. Para mueblería, es importante la tipificación por grado de apariencia y tomar en cuenta los coeficientes de contracción, hinchamiento y anisotropía, indicadores de estabilidad dimensional. Para madera estructural empleada en construcción es sustancial la resistencia, en este trabajo evaluada a través del módulo dinámico de elasticidad.

A fin de cuantificar la potencialidad de *Grevillea robusta* como recurso forestal, es necesario conocer los rendimientos asociados a cada uno de los procesos involucrados en su cadena productiva y así evaluar la factibilidad de explotar el recurso a escalas mayores. La producción de madera aserrada es la actividad que identifica al sector industrial maderero de la provincia de Misiones (SIFIP, 2013). Es indispensable avanzar hacia una segunda transformación, destacando los valores de la madera obtenida según calidades diferenciales para posicionar al producto en el mercado nacional y a futuro, internacional. Avanzar hacia el desarrollo de productos de mayor valor agregado, aprovechando piezas de distintas longitudes para la elaboración de tableros, puertas, molduras, partes y piezas de muebles es una demanda urgente hacia los profesionales del sector forestal. El conocimiento exhaustivo de la madera de *Grevillea robusta* es importante para hacer un aprovechamiento tecnológico racional de la misma. Si bien la especie es implantada como acompañante a cultivos agrícolas en Kenia, Ruanda, Burundi, Brasil y Argentina, se desconoce su comportamiento frente a distintos esquemas de manejo forestal intensivo (Baggio *et al.*, 1997; Roose y Ndayizigiye, 1997; Akyeampong *et al.*, 2000; Lott *et al.*, 2000).

HIPÓTESIS

La densidad inicial de plantación de *Grevillea robusta* incide en la producción y calidad de madera a obtener.

La densidad inicial de plantación influye en la proporción de biomasa y en la dimensión y distribución de los distintos compartimentos aéreos de *Grevillea robusta*.

La arquitectura de copa de *Grevillea robusta*, es decir, la distribución de la biomasa en los diferentes compartimentos, afecta el crecimiento de los individuos.

La duraminización de fuste en *Grevillea robusta* es afectada por la densidad de plantación.

El ahusamiento del fuste de *Grevillea robusta* está influenciado por la densidad inicial de plantación. A mayor densidad de plantación menor conicidad y mayor rendimiento de madera aserrada.

A menor densidad de plantación de *Grevillea robusta* aumenta la presencia de nudos en la madera afectando el grado de calidad de las piezas a obtener en el aserrado.

A mayor densidad de plantación se incrementa la longitud de las fibras del leño de *Grevillea robusta*.

La densidad básica de la madera de *Grevillea robusta*, su coeficiente de retractsibilidad, dureza y módulo de elasticidad y rotura varían según la densidad de plantación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la influencia de la densidad de plantación sobre la biomasa aérea y las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Grevillea robusta* implantada en Misiones, Argentina, en vistas a la obtención de madera de calidad.

Objetivos específicos

Evaluar el grado de influencia de la utilización de las distintas variables morfométricas y ecofisiológicas en la valoración del tratamiento silvícola aplicado.

Estudiar comparativamente la calidad de madera bajo diferentes densidades de plantación.

Establecer la relación existente entre las variables morfométricas y anatómicas con la calidad de la madera según las distintas densidades de plantación.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Achim A., Gardiner B. and Daquitaine R. 2006. Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. *New Zealand Journal of Forestry Science* 36:246-264.
- Akyeampong E., Hitimana L., Torquebiau E. and Munyemana P. C. 2000. Multistrata Agroforestry with Beans, Bananas and *Grevillea robusta* in the Highlands of Burundi. *Experimental Agriculture* 35:357-369.
- Albaugh T., Bergh J., Lundmark T., Nilsson U., Stape J., Lee Allen H. and Linder S. 2009. Do biological expansion factors adequately estimate stand-scale aboveground component biomass for Norway spruce?. *Forest Ecology and Management* 258:2628–2637.
- André F., Jonard M. and Ponette Q. 2010. Biomass and nutrient content of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) stem and branches in a mixed stand in southern Belgium. *Science of the Total Environment* 408:2285–2294.
- Baggio A. J., Caramori P. H., Androcioli Filho A. and Montoya L. 1997. Productivity of southern Brazilian coffee plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. *Agroforestry Systems* 37:111-120.
- Barth S. R., Giménez A. M., Joseau M. J., Gauchat M. E. y Fassola H. E. 2015. Efecto de la densidad de plantación de *Grevillea robusta* A. Cunn. sobre la calidad de la madera en vistas a un uso agroforestal de la especie. Libro de Actas. VIII Congreso Internacional sobre Sistemas Agroforestales para la Producción Pecuaria y Forestal Sostenible. III Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles. Iguazú. Argentina. Pp. 243 – 248.
- Beaulieu E., Schneider R., Berninger F., Huor Ung C. and Swift E. 2011. Modeling jack pine branch characteristics in Eastern Canada. *Forest Ecology and Management* 262:1748–1757.
- Briggs D., Ingaramo L. and Turnblom E. 2007. Number and diameter of breast-height region branches in a Douglas-fir spacing trial and linkage to log quality. *Forest Products Journal* 57, 28–34.

- Boland D. J., Brooker M. I. H., Chippendale G. M., Hall N., Hyland B. P. M., Johnston R. D., Kleinig D. A. and Turner J. D. 1984. *Forest trees of Australia*. 4th edition. Melbourne, Australia: 687 pp.
- Carlson C.A., Fox T.R., Creighton J., Dougherty P. M. and Johnson J. R. 2009. Nine-year growth response to planting density manipulation and repeated early fertilization in a loblolly pine stand in the Virginia Piedmont. *South. J. Appl. For.* 33 (3): 109–114.
- Chiba Y. 1997. Architectural analysis of relationship between biomass and basal area based on pipe model theory. *Ecological Modelling* 108 (1-3): 219-225.
- Cournède P. H., Kang M. Z., Mathieu A., Yan H., Hu B. G. and De Reffye P. 2006. Structural factorization of plants to compute their functional and architectural growth. *Simulation* 82 (7):427–438.
- Diao J., De Reffye P., Lei X., Guo H. and Letort V. 2012. Simulation of the topological development of young eucalyptus using a stochastic model and sampling measurement strategy. *Computers and Electronics in Agriculture* 80:105-114.
- Esquivel J., Lacorte S., Goldfarb C., Fassola H., Colcombet L. y Pachas N. 2010. Sistemas silvopastoriles con especies maderables en la República Argentina. *Actas VI Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la producción Pecuaria Sostenible*. Panamá. Pp. 68.
- Fassola H., Moscovich F., Domecq C., Ferrere P., Lacorte S., Hampel H., Maletti C. y Alegranza D. 2004. Regulación de la densidad en rodales de *Grevillea robusta* A. Cunn. para la producción de madera de calidad y forraje en el sur de la provincia de Misiones. *INTA. Ediciones RIA* 33 (1):15-38.
- Forrester D., Medhurst J., Wood M., Beadle C. and Valencia J. 2010. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid – Wood products from Eucalyptus plantation: An Australian perspective. *Forest Ecology and Management* 259:1819–1835.
- Gerendiain A. Z., Peltola H., Pulkkinen P., Ikonen V. P. and Jaatinen R. 2008. Differences in growth and wood properties between narrow and normal crowned types of Norway spruce grown at narrow spacing in Southern Finland. *Silva Fennica* 42(3):423-437.
- Gonçalves Martins E. e Neves E. J. M. 2004. *Grevillea robusta* (Cunn.): Sementes Melhoradas para Usos Múltiplos. Comunicado Técnico 126. Embrapa Florestas. Brasil. 4 pp.
- Hardwood C. E. and Gethaun A. 1990. Australian tree finds success in Africa. *Agroforestry Today* 2(1):8-10.
- Harwood C. E. 1992. Natural distribution and ecology of *Grevillea robusta*. In: *Grevillea robusta in Agroforestry and Forestry*. Proceedings of an International Workshop. Edited by C. E. Harwood. ICRAF: Nairobi: Pp. 21 – 28.

- Hein S. and Spiecker H. 2007. Comparative analysis of occluded branch characteristics for *Fraxinus excelsior* and *Acer pseudoplatanus* with natural and artificial pruning. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 1414–1426.
- Hein S., Mäkinen H., Yue C. and Kohnle U. 2007. Modelling branch characteristics of Norway spruce from wide spacings in Germany. *Forest Ecology and Management* 242:155–164.
- Hein S., Weiskittel A. and Kohnle U. 2008. Branch characteristics of widely spaced Douglas-fir in south-western Germany: Comparisons of modelling approaches and geographic regions. *Forest Ecology and Management* 256:1064–1079.
- Kang M. Z., Cournède P. H., De Reffye P. and Hu B. G. 2008. Analytic study of a stochastic plant architectural model: application to the Green Lab model. *Mathematics and Computers Simulation* 78: 57–75.
- Kint V., Hein S., Campioli M. and Muys B. 2010. Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees. *Forest Ecology and Management* 260:2023–2034.
- Korol R. L., Running S. W. and Milner K. S. 1995. Incorporating inter tree competition into an ecosystem model. *Canadian Journal of Forest Research* 25:413–424.
- Landsberg J. J. and Waring R. H. 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95:209–228.
- Lobão M. S., Della Lucia R. M., Moreira M. S. y Gomes A. 2004. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Revista Árvore* 28(6):889-894.
- Lott J. E., Howard S. B., Ong C. K. and Black C. R. 2000. Long term productivity of a *Grevillea robusta*-based agroforestry system in semi-arid Kenya: I, Tree Growth. *Forest Ecology and Management* 139:175-186.
- Macdonald E. y Humbert J. 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce Scotland. *Forestry* 75 (2): 108–134.
- Makela A. 1986. Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth in trees. *J. Theor. Biol.* 123:103–120.
- Muñiz Bolzon G. 1993. Caracterização e desenvolvimento de Modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. Tese doutoral em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil. 252 pp.
- Roose E. and Ndayizigiye F. 1997. Agroforestry, water and soil fertility management to fight erosion in tropical mountains of Rwanda. *Soil Tech.* 11:109-119.

- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K. and Kira T. 1964a. A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology* 14:97-105.
- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K. and Kira T. 1964b. A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology* 14:133-139.
- SIFIP. 2013. Sistema de información Foresto Industrial de la Provincia de Misiones. Publicado en Internet, disponible en:
<http://extension.facfor.unam.edu.ar/sifip/index.html>. Activo en noviembre 2015.
- Subedi S., Kane M., Zhao D., Borders B. and Greene D. 2012. Cultural intensity and planting density effects on aboveground biomass of 12-year-old loblolly pine trees in the Upper Coastal Plain and Piedmont of the southeastern United States. *Forest Ecology and Management* 267:157-162.
- Swain E. H. F. A. 1928. Silvicultural note on southern silky oak (*Grevillea robusta*). *Bulletin 9 Queensland Forest Service*. 18 pp.
- Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M. and Usoltsev V. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management* 257:1004-1013.
- Valentine H.T. 1985. Tree-growth models: derivations employing the pipe-model theory. *J. Theor. Biol.* 117:579-585.
- Vos J., Evers J. B., Buck Sorlin G. H., Andrieu B., Chelle M. and De Visser P. H. B. 2010. Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. *Journal of Experimental Botany* 61 (8):2101-2115.
- Wang F., Kang M. Z., Lu Q., Letort V., Han H., Guo Y., De Reffye P. and Li B. G. 2011. A stochastic model of tree architecture and biomass partitioning: application to Mongolian Scots pines. *Annals of Botany* 107:781-792.
- Wang Y. P. and Jarvis P. G. 1990. Influence of crowns structural properties of PAR absorption, photosynthesis and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO, radiation and PSYN model). *Tree physiology* 7:297-316.
- Zhao D., Kane M. and Borders B. 2011. Growth response to planting density and management intensity in loblolly pine plantations in the southeastern United States Lower Coastal Plain. *Ann. For. Sci.* 68: 625-635.
- Zobel B. and Van Buijtenen B. 1989. *Wood variation: its causes and control*. Springer Verlag. Nueva York. 363 pp.
- Zobel B. and Jett J. B. 1995. *Genetics of wood production*. Berlin, New York: Springer-Verlag. 352 pp.

COMPARTIMENTALIZACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA

INTRODUCCIÓN

La masa forestal es un importante almacenador de Carbono. Éste se acumula en la biomasa de sus diferentes compartimentos (Didion *et al.*, 2014).

La biomasa, materia orgánica generada por las plantas como resultado de la actividad fotosintética, es de suma importancia para determinar la productividad de un ecosistema. Por lo tanto, el conocimiento del desempeño de la especie en cuanto a la acumulación de biomasa y sus vinculaciones al crecimiento y calidad de madera obtenida, es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la actividad silvícola. La acumulación de carbono está influenciada principalmente por factores físicos, edáficos y por patrones de disturbio que afectan la estructura y las reservas de biomasa y carbono en la masa forestal. El manejo forestal puede producir cambios en el balance del Carbono (Nave *et al.*, 2010; Jandl *et al.*, 2011). Alteraciones en el uso de los recursos (luz, agua y nutrientes) afectan tanto al estrato arbóreo como al sotobosque (Marilou *et al.*, 2004). Según Herrera *et al.* (2001) este efecto dependerá del área basal del estrato arbóreo.

El crecimiento y la calidad de la madera, producto del manejo forestal, se halla vinculado a un incremento de copa. Al aumentar o disminuir la densidad arbórea en una determinada plantación se presentan diferentes comportamientos como consecuencia de la competencia por nutrientes e insumos, lo que produce variaciones en la actividad fotosintética de los individuos (Rocha y Della, 1987; Zobel y Van Buijtenen, 1989; Achim *et al.*, 2006; Teobaldelli *et al.*, 2009; Beailieu *et al.*, 2011; Prasad *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011).

Estimar la variación en la acumulación de biomasa en plantaciones es una herramienta útil en la valoración cuantitativa del Carbono almacenado en las estructuras vivas y muertas en un momento dado. Dicho conocimiento es de vital importancia para evaluar su contribución al ciclo del Carbono, dada las implicancias de la presencia de CO₂

ligada al cambio climático global. Surge así el interés en conocer la tasa y los patrones de partición de la biomasa en los distintos compartimentos del árbol (Adegbidi *et al.*, 2002).

La hipótesis de trabajo planteada sostenía que la estructura de la masa forestal varía según el manejo silvícola adoptado. Ningún silvicultor discutiría el hecho de que los espaciamientos mayores entre árboles favorecen un mayor diámetro de las trozas maderables, pero se desconocen los efectos que dichos espaciamientos tienen en la compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* y en el sotobosque generado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado para el presente estudio fue colectado en un ensayo implantado con material genético de procedencia local obtenido de un área productora de semillas perteneciente a INTA Estación Experimental Agropecuaria Bella Vista ubicada en la localidad de Bella Vista, provincia de Corrientes, Argentina.

El estudio fue realizado con datos recolectados en un ensayo de densidades iniciales de plantación (Tabla 2.1) de *Grevillea robusta* instalado por INTA en el año 1994 en campos de la empresa Danzer forestaciones S. A., actualmente Garruchos Forestal S. A., en Posadas, zona Sur de la Provincia de Misiones, Argentina (Figura 2.1).

Tabla 2.1. Espaciamientos y densidades iniciales de plantación del ensayo de *Grevillea robusta* instalado en Posadas, Misiones, Argentina

Espaciamiento (m)	Densidad (plantas/hectárea)
7,9 x 7,85	162
5,2 x 5,10	375
3,7 x 3,60	750
2,5 x 2,65	1500

Todos los tratamientos sufrieron 4 podas con remoción del 30 % de la copa viva en cada uno de ellos, hasta llegar a una altura de base de copa verde de 4,5 metros en los

tratamientos menos densos y cercana a los 5,2 metros en las mayores densidades. Las podas se realizaron anualmente desde los 3 hasta los 6 años de edad (Fassola *et al.*, 2004).

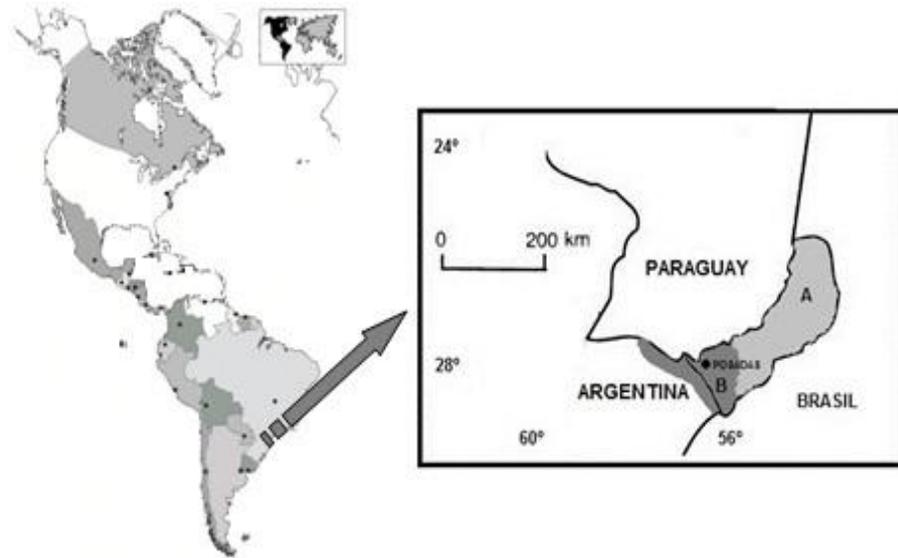


Figura 2.1. Localización del área de estudio. Referencias: A, Distrito de las Selvas Mixtas; B, Distrito de los Campos

Posadas, pertenece a la Selva Paranaense (Dominio Amazónico), Distrito de los Campos (Cabrera, 1976). Este distrito abarca la zona suroeste de la provincia de Misiones y noreste de Corrientes, Argentina, donde surge el ecotono con la Provincia Chaqueña (Figura 2.1). El clima no difiere mucho del Distrito de las Selvas Mixtas (zona centro y norte de Misiones) con suelos lateríticos. No obstante, las precipitaciones son ligeramente menores, 1800 versus 2000 mm/año (Burgos, 1970), siendo más marcada esta diferencia en época invernal, lo que junto a otras características, dan lugar a diferencias notorias en la vegetación preponderante. La vegetación predominante en esta zona es campos o sabanas de gramíneas. La selva solo aparece a orillas de ríos y arroyos y en pequeñas porciones o islas en lugares con mayor humedad del suelo. Según la clasificación de Köppen, el clima es tipo Cfa, macrotérmico, constantemente húmedo y subtropical (Rodríguez *et al.*, 2004). La precipitación media de Posadas durante el período 1994 a 2012 fue de 1866 mm. La temperatura media en el mismo período fue de 22,2 °C (INTA Centro Regional Misiones, 2013). Los suelos, derivados de la meteorización de rocas basálticas, presentan las características detalladas en la Tabla 2.2, siendo arcillosos en todo su perfil. Los valores de

pH indican que son suelos fuertemente ácidos, lo que queda reflejado en las bajas concentraciones de P (Fósforo) disponible en el suelo. La densidad aparente del suelo se comporta de manera inversa a lo esperado, presentándose los mayores valores de densidad en superficie y disminuyendo con la profundidad debido al uso ganadero anterior.

Tabla 2.2. Densidad aparente y contenido de nutrientes del suelo a distintas profundidades

Materia orgánica	Densidad aparente	pH		N total	P	K	Ca	Mg
espesor	Mg.m ⁻³		%			Kg.ha ⁻¹		
0-10	1,47	4,63	3,12	2058	2,8	510,2	1423,0	347,5
10-30	1,45	4,60	2,82	3770	3,7	938,7	1850,2	605,5
30-60	1,44	4,58	2,50	4752	2,9	1583,7	2246,4	601,3

En la evaluación del sotobosque la muestra estuvo conformada por 10 parcelas por tratamiento y estrato. En el estrato arbustivo se trabajó con parcelas de 2 x 1 m separando el material foliar y leñoso. El material herbáceo fue colectado en subparcelas de 1 x 1 m. En cuanto a la necromasa del piso forestal se colectó material de subparcelas de 0,5 x 0,5 m tomándose muestras de hojas y material leñoso en distinto grado de descomposición. Todo el material colectado fue identificado, pesado a campo y secado posteriormente en estufa a 70 °C para la obtención del peso seco (Figura 2.2).



Figura 2.2. Muestreo de sotobosque en parcelas de *Grevillea robusta*

Para el estrato arbóreo, se siguió la metodología propuesta por Köhl *et al.* (2006). Si bien en la metodología propuesta por estos autores hace referencia a considerar 2 individuos por cada posición social, dominantes, codominantes y suprimidos. En este estudio se consideró en estas categorías a 2 árboles por clase diamétrica superior, media e inferior. Esto se debió a que en el tratamiento de 162 a/ha se estimó que hubo escasa o nula competencia por recursos por lo que se consideró inapropiado hablar de árboles suprimidos en el estricto sentido de la palabra. Se realizó un muestreo destructivo aleatorio estratificado, apeando 6 individuos por cada densidad de plantación, tomando al azar 2 ejemplares por cada estrato.

Para el cálculo de biomasa se procedió al apeo, desrame y defoliado de los individuos seleccionados, procediéndose al pesaje del total de hojas y ramas mediante una balanza electrónica con una capacidad de 300 kg y un error de 0,02 % (Figura 2.3). Una muestra del material de hojas y ramas fue secada a $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{-}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en laboratorio con el fin de estimar la biomasa de los distintos compartimentos (Schlegel *et al.*, 2000; Fassola *et al.*, 2010). Para ello, se realizó el pesado húmedo y seco de la muestra para la obtención de la relación que determine la biomasa del individuo. En laboratorio se empleó una balanza analítica con capacidad de 3 kg y una precisión de 0,01 g. Se tomó la precaución de que cada muestra presente la debida identificación a fin de que el coeficiente de conversión obtenido para cada caso en particular pueda ser aplicado al peso total de hojas y ramas de la copa de cada individuo.



Figura 2.3. Apeo y desarme de individuos de *Grevillea robusta*. a, medición de fuste; b, trozado de copa; c, clasificación de ramas; d y e, deshoje

La biomasa de fuste fue obtenida a partir de volumetría y cálculos de densidad básica de distintas porciones del árbol (1%, 15%, 30%, 50% y 80% de su altura relativa). A partir de discos de 2 cm de espesor, provenientes de dichas alturas relativas, se obtuvieron probetas cúbicas de 2 cm de lado a partir de listones de un largo equivalente al diámetro de los discos (IRAM 9544, 1973). La densidad básica (db) se calculó como:

$$db = Pa/Vh \quad 2.1.$$

Donde, Pa es el peso anhidro y Vh es el volumen de la probeta al contenido de humedad máximo.

El volumen de las probetas se calculó a través del principio de Arquímedes, ya que es considerado uno de los más prácticos y precisos. El peso anhidro de probetas se obtuvo por pesaje, tras secado en estufa hasta peso constante a una temperatura de 103 ± 2 °C. La biomasa de corteza se estableció, según la metodología empleada por Martiarena *et al.* (2011), a partir de la relación entre el porcentaje de peso de este compartimiento y el porcentaje del peso de la sección correspondiente del fuste previamente determinado:

$$\% \text{ de corteza} = \text{peso de corteza} * 100 / \text{peso de fuste} \quad 2.2$$

Para la comparación del efecto de la densidad de plantación en la distribución de la biomasa, se utilizaron modelos mixtos. Para ello se consideró la densidad de plantación como efecto fijo y a la parcela y al árbol como efectos aleatorios. En todos los casos se

trabajó con test DGC con $P \leq 0,05$ (Di Rienzo *et al.*, 2002). El procesamiento se realizó a través del software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En *Grevillea robusta* el espaciamiento inicial tuvo efecto en el sotobosque (Tabla 2.3) y en el crecimiento del árbol y su ahusamiento (Tabla 2.4). Este comportamiento es citado también para *Eucalyptus* (Schönau y Coetzee, 1989; Gerrand *et al.*, 1997; Neilsen y Gerrand, 1999). Gran parte de este efecto es atribuible a la incidencia de la densidad de plantación en el microclima que se genera en la plantación, especialmente en lo relacionado a luz. El tamaño y arquitectura de la planta determinan la cantidad de luz que interceptan (Caldwell *et al.*, 1986; Beadle, 1997; Valladares 1999). La producción de biomasa, bajo un conjunto dado de condiciones, se relaciona con la cantidad de luz interceptada por la canopia (Cannell, 1989; Kupperts, 1994).

La biomasa total del sotobosque se diferenció entre tratamientos ($P < 0,05$) en función a la densidad de plantación, siendo significativamente menor en el tratamiento de 162 plantas por hectárea (a/ha). La presencia o ausencia de competencia da lugar a una diferenciación de la composición del sotobosque siendo importante en cuanto a retención de agua y nutrientes (Nambiar, 1985). Un caso particular se notó para la densidad de 375 a/ha, caso analizado posteriormente en vinculación a la biomasa arbórea (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Biomasa aérea ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) acumulada en el sotobosque de *Grevillea robusta* en función de la densidad de plantación

Compartimento	Densidad (a/ha)				Error estándar
	162	375	750	1500	
Arbustivo hojas	0,31 ^c	0,38 ^b	0,28 ^d	0,52 ^a	0,05
Arbustivo ramas	0,64 ^c	1,21 ^b	2,44 ^a	1,08 ^b	0,05
Herbáceo	0,50 ^a	0,44 ^b	0,41 ^c	0,40 ^c	0,06
Piso hojas	12,05 ^c	14,54 ^a	7,58 ^d	12,76 ^b	0,36
Piso ramas	0,87 ^c	0,75 ^d	4,64 ^a	2,53 ^b	0,15
Biomasa total sotobosque	14,37 ^c	17,32 ^a	15,35 ^b	17,29 ^a	0,14

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

La diferencia de biomasa acumulada en el estrato arbustivo hojas fue estadísticamente significativa ($P<0,05$) entre todos los tratamientos, siendo superior a mayor densidad de plantación. En el compartimento ramas de dicho estrato las diferencias entre tratamientos no denotaron una tendencia en este sentido, aunque en la menor densidad de plantación acumuló la menor cantidad de biomasa ($P<0,05$). En el estrato herbáceo, hubo tendencia ($P<0,05$) de mayor presencia de biomasa a menores densidades de plantación, alcanzando un valor de $0,50 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ a 162 a/ha. Este comportamiento puede explicarse debido a una sustitución de especies, al predominar las plantas herbáceas disminuye la presencia de especies arbustivas. La predominancia del estrato herbáceo a mayor apertura del dosel podría deberse a que en espacios abiertos de mayor tamaño aparece la vegetación natural típica de la zona de campos y estepas (Cabrera, 1976). En sintonía con esta apreciación, en la Patagonia Argentina, Rusch *et al.* (2008) comentan que bajas coberturas arbóreas dadas por plantación de especies exóticas promueven la supervivencia y regeneración de las especies dominantes de pastizales de *Festuca* spp. o de bosques de *Austrocedrus chilensis* (ciprés de la cordillera), una especie arbórea nativa de la región. En doseles más cerrados se dan un mayor número de especies arbustivas que se ven favorecidas por mayor humedad. Esto último hace que se pueda divisar la presencia de helechos.

En cuanto a la necromasa del piso forestal los tratamientos fueron estadísticamente diferentes entre sí ($P < 0,05$). La gran acumulación de hojas en el tratamiento de mayor densidad de plantación puede deberse a elevada mortandad por competencia. La biomasa leñosa de este estrato presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre todos los tratamientos destacándose su disminución a menores densidades de plantación. La acumulación de necromasa de hojas y ramas sigue la misma tendencia detectada en *Pinus taeda* cultivado en la zona norte de Misiones, Argentina. Martiarena *et al.* (2011), analizando el efecto del raleo en plantaciones de 711, 364 y 122 a/ha, encontraron en necromasa valores de 25, 18,3 y 16,7 Mg.ha⁻¹, respectivamente. La diferencia entre ambas especies se debe a características de forma y estructura propias de cada una de ellas.

Considerando el estrato arbóreo, en la Tabla 2.4 se muestran diferentes variables de estado según densidades de plantación.

Tabla 2.4. Variables dendrométricas del rodal de *Grevillea robusta*. Edad 18 años

Densidad inicial de plantación (a/ha)	Volumen c/c (m ³ /ha)	Dap c/c (cm)	Altura media de árboles dominantes (m)	Ahusamiento (cm/m)
162	111,11 ^b (16,0)	32,99 ^a (6,4)	18,00 ^b (1,9)	1,96 ^a (0,2)
375	163,93 ^b (34,1)	29,02 ^b (6,1)	20,49 ^a (3,2)	1,86 ^a (0,3)
750	316,42 ^a (68)	25,44 ^c (5,8)	20,6 ^a (2,2)	1,74 ^a (0,3)
1500	309,03 ^a (60)	20,15 ^d (5,3)	20,66 ^a (2,5)	1,39 ^b (0,3)

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$). Desvío estándar entre paréntesis

El dap medio fue afectado por la cantidad de árboles por hectárea con una tendencia creciente significativa hacia la menor densidad, pasando de 20,15 cm (1500 a/ha) a 32,99 cm (162 a/ha); lo que significa una diferencia de 64 % entre la mayor y la menor densidad de plantación. La altura media de los árboles dominantes se mostró levemente afectada por el tratamiento silvícola aplicado. No se evidenciaron diferencias significativas entre 375 y 1500 a/ha, pero sí entre éstos tratamientos y 162 a/ha. Este hecho podría deberse a que la ausencia de competencia por luz hace innecesario que el individuo busque ganar altura a fin de optimizar el aprovechamiento de dicho recurso. Un comportamiento similar fue

observado por Bernardo *et al* (1998) en *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* y *E. urophylla*.

La densidad de plantación influyó significativamente ($P < 0,05$) en la producción volumétrica individual y del rodal. Considerando los resultados obtenidos a nivel de rodal, a mayor densidad de plantación (1500 a/ha) se obtuvo un volumen de 309,03 m³/ha, lo que representa un valor superior en un 47 % y un 64% respecto a 375 y 162 a/ha. El ahusamiento fue menor en la mayor densidad de plantación, diferenciándose de los demás tratamientos. La fuerte competencia entre individuos hizo incrementar la mortalidad de éstos en las mayores densidades de plantación. A los 18 años de edad, a 1500 a/ha la sobrevivencia fue de 68 %, mientras que en los demás tratamientos el valor promedio superó 80 %.

Individuos de mayor acumulación de biomasa fustal hicieron evidente diferencias en la biomasa del resto de los compartimentos aéreos del árbol. Se detectaron así respuestas diferenciadas en acumulación de hojas y ramas vivas y muertas, así como también en el tamaño y acumulación de ramas (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Biomasa aérea individual (kg) de *Grevillea robusta* a 18 años de edad

Compartimento	Densidad (a/ha)				Error estándar
	162	375	750	1500	
Hojas	17,53 ^a	16,29 ^a	10,03 ^b	4,29 ^b	2,7
Ramas vivas < 5 cm	60,40 ^a	47,91 ^a	40,03 ^a	20,38 ^b	9,10
Ramas vivas > 5 cm	25,68 ^a	27,96 ^a	0,01 ^c	3,99 ^b	5,10
Ramas muertas	0,27 ^b	2,28 ^b	0,43 ^b	7,08 ^a	0,58
Subtotal Ramas	86,35 ^a	78,15 ^a	40,47 ^b	31,45 ^b	9,53
Corteza	38,78 ^a	25,35 ^a	28,57 ^a	13,39 ^b	5,20
Fuste	250,24 ^a	204,21 ^a	228,40 ^a	112,06 ^b	48,60
Biomasa total	392,90 ^a	324,00 ^a	307,47 ^a	161,19 ^b	60,50

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Analizando lo ocurrido a nivel de árbol individual, la densidad de plantación influyó ($P < 0,05$) en la partición de biomasa aérea del árbol. La biomasa total fue menor a mayor densidad de plantación. A menores densidades de plantación (162 y 375 a/ha) la acumulación de biomasa de hojas fue mayor que a mayores densidades de plantación (750 y 1500 a/ha). Se confirman los resultados obtenidos para otras especies, los cuales sugieren que a mayores densidades de plantación predominan ramas de menor diámetro (Mäkela, 1997; Neilsen y Gerrand, 1999). El hecho de que a menores densidades de plantación se dieran mayores diámetros de rama afecta el rendimiento de madera aserrada para los diferentes grados de calidad. Se hace entonces indispensable priorizar la realización de podas en tiempo y forma para no perjudicar el valor económico del producto a obtener. Si nuestra perspectiva es maximizar volumen de madera libre de nudos, la selección del espaciamiento inicial es de suma importancia. La competencia por recursos hizo que el tratamiento silvícola de 1500 a/ha evidenciara una mayor mortandad de ramas. Neilsen y Gerrand (1999) hallaron que un incremento en la competencia entre árboles de *Eucalyptus nitens* tuvo influencia en la forma del fuste, sin embargo, *Grevillea robusta* no presentó diferencias estadísticamente significativas en ahusamiento al comparar los tratamientos de 162 a 750 a/ha entre sí. Dicha diferencia sí fue observada entre éstos tratamientos y el de 1500 a/ha, en el que es evidente, también, una menor acumulación de biomasa total a nivel individual. Densidades de 162 a 750 a/ha tuvieron mayor producción individual de madera en el fuste y de corteza.

Al mismo tiempo que la biomasa individual tiende a incrementarse a menores densidades de plantación, la biomasa total a nivel de rodal ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) se incrementa a mayores densidades de plantación (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Biomasa arbórea a nivel de rodal en *Grevillea robusta* a 18 años de edad. (Mg . ha⁻¹)

Compartimento	Densidad (a/ha)				Error estándar
	162	375	750	1500	
Hojas	3,73 ^c	5,05 ^b	8,18 ^a	4,89 ^b	0,52
Ramas vivas < 5 cm	8,83 ^d	14,11 ^c	23,58 ^a	23,13 ^b	0,97
Ramas vivas > 5 cm	10,38 ^a	7,68 ^b	0,00 ^d	0,17 ^c	0,00
Ramas muertas	0,27 ^b	2,28 ^b	0,43 ^b	7,08 ^a	0,78
Subtotal Ramas	19,48 ^d	24,07 ^c	24,01 ^b	30,38 ^a	3,32
Corteza	6,58 ^b	8,55 ^b	17,36 ^a	14,79 ^a	1,16
Fuste	49,47 ^d	77,75 ^c	127,24 ^b	134,44 ^a	4,27
Biomasa total	79,26 ^d	115,42 ^c	176,79 ^b	184,50 ^a	6,09

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (P>0,05)

A nivel de rodal, mayores densidades de plantación tienden a acumular mayor biomasa de ramas finas por hectárea, incrementándose la presencia de ramas muertas a los 1500 a/ha debido a la competencia por recursos (luz). Por otra parte los tratamientos de 375 y 162 a/ha presentaron mayor biomasa de ramas gruesas por hectárea. En lo que respecta a la acumulación de biomasa en fuste a nivel de rodal, esta difirió según tratamiento y mostró una tendencia a disminuir a menores densidades de plantación. En los tratamientos de mayor densidad de plantación el número de plantas por hectárea tiene una alta incidencia en la producción total de biomasa del rodal. Esto concuerda con Pinkard y Neilsen (2003) al estudiar *Eucalyptus nitens*.

Analizando la incidencia de cada compartimento aéreo en la biomasa del rodal (Figura 2.4), el efecto de la densidad de plantación es evidente en la biomasa de fuste donde existe un incremento medio del 15 % de su representatividad a favor de las mayores densidades. Si bien se presentan diferencias estadísticas significativas en todos los componentes, las tendencias no son definidas. Es destacable que a 1500 a/ha se presenta el menor desarrollo de árbol individual, en coincidencia con la menor presencia de hojas en relación a los demás componentes aéreos del dosel (P<0,05).

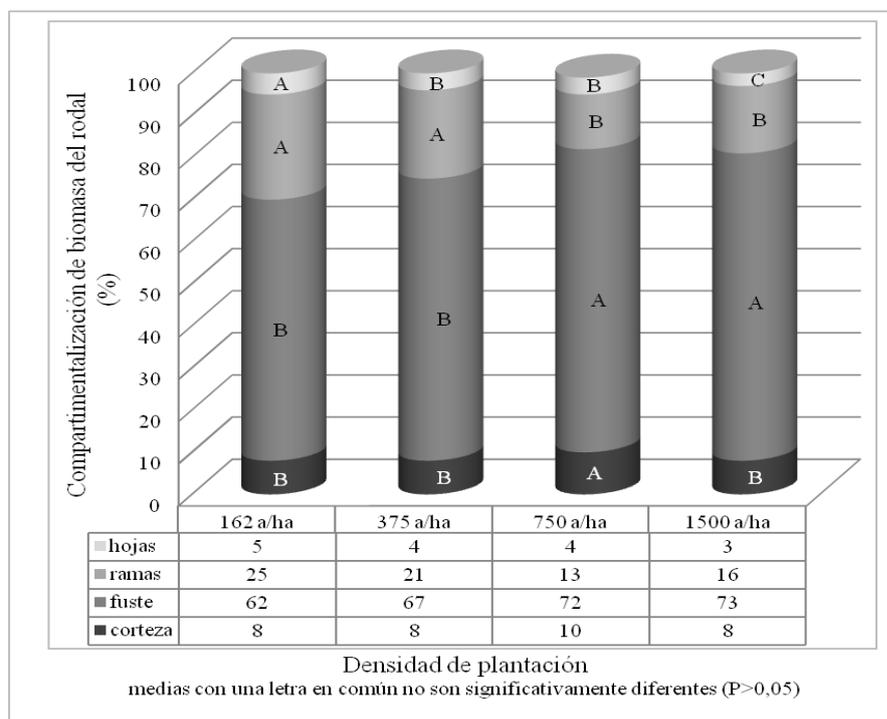


Figura 2.4. Distribución representativa de los distintos componentes de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* según densidad de plantación

En *Grevillea robusta*, la incidencia de la biomasa de hojas fue menor a la reportada para las demás especies de cultivo en Misiones, Argentina, para producción de madera. En *Pinus taeda*, Fassola *et al.* (2012) hacen referencia a valores promedio de 6 % de acículas, 18 % de ramas, 74 % de fuste y 2 % de corteza. Éste último valor denota una mayor participación de corteza en la biomasa de *Grevillea robusta*. Según Winck *et al.* (2015) en rodales de *Eucalyptus grandis* de la misma zona de cultivo, la biomasa foliar representa 2 %, las ramas 12% y el fuste 86 % de la biomasa total, considerándose despreciable la proporción de corteza. Este patrón diferencial de acumulación de biomasa a mayores densidades de plantación puede deberse a una diferenciación en la reacción frente a la competencia. Tal lo mencionado por Martiarena *et al.* (2007) para *Pinus taeda*, es probable que acumule mayor cantidad de biomasa en fuste para poder acceder al dosel superior en busca de luz a expensas de otros órganos o compartimentos. Esto es coincidente con que, a mayores densidades de plantación se dieron las mayores alturas (Tabla 2.4). La mayor acumulación relativa de hojas y ramas se dio en los tratamientos de 162 a 750 a/ha, en coincidencia con el mayor dap c. c. de los individuos. El aumento de la proporción de ramas puede deberse a la necesidad de mayor capacidad portante de la copa para sostener

al componente fotosintético responsable del mayor crecimiento diamétrico (Henskens *et al.*, 2001).

La incidencia del sotobosque en el análisis de la biomasa total por hectárea (componentes arbóreos y del sotobosque) presentó una tendencia creciente desde la mayor a la menor densidad de plantación. Mientras que a 1500 y 750 a/ha alcanza 9,37 y 8,68% respectivamente, sin diferencia estadísticamente significativa entre ellos, a 375 a/ha llega a 15% y a 152 a/ha alcanza un 18 % ($P > 0,05$). En ensayos llevados a cabo en la zona norte de Misiones con *Pinus taeda*, Martiarena (2008) y Martiarena *et al.* (2011) hallaron una menor incidencia del sotobosque en la biomasa total pero manteniendo igual comportamiento frente a las distintas densidades de plantación (a mayor cantidad de a/ha se presenta una mayor proporción de biomasa de sotobosque). La menor acumulación de biomasa por hectárea dada en *Grevillea robusta*, en comparación a *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis*, las otras dos especies de mayor superficie cultivada en la región, se debe a diferencias de arquitectura y composición de la parte aérea de los árboles.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La densidad inicial de plantación influye en el desarrollo del sotobosque de rodales de *Grevillea robusta*, así como en la distribución y acumulación de su biomasa aérea. En plantaciones de *Grevillea robusta* del sur de la provincia de Misiones (Argentina), los espaciamientos mayores dan lugar a una menor presencia de biomasa de estrato herbáceo en el sotobosque, pero dicha tendencia no se mantiene en el estrato arbustivo en donde a una mayor densidad de plantación se presenta una mayor acumulación de biomasa, en particular de ramas. En cuanto al piso forestal, existe un mayor depósito de ramas muertas en las mayores densidades, esta tendencia no se mantiene al considerar a las hojas muertas. Mayores espaciamientos presentan un mayor diámetro a altura de pecho, aunque no se evidencian diferencias sustanciales en cuanto a altura media del rodal con excepción del tratamiento de 162 a/ha. El ahusamiento a 1500 a/ha es menor que en los demás tratamientos. La densidad de plantación afecta la producción de ramas. Cuanto mayor es la densidad de plantación mayor es la acumulación de ramas, en particular, ramas finas. Las ramas gruesas predominan en los mayores espaciamientos. La densidad de plantación

afecta a la acumulación de biomasa fustal del rodal. Menores espaciamientos presentan mayores volúmenes de madera a pesar de su menor diámetro individual. En los tratamientos de mayor densidad de plantación el fuste representa más del 70 % de la biomasa total.

Los resultados obtenidos justifican recomendar el manejo de la masa forestal en función a los productos que se desea obtener. La mayor densidad de plantación asegura mayores volúmenes de madera mientras que una menor densidad de plantación maximiza el valor comercial de la madera al lograr trozas y por ende tablas de mayores dimensiones. Esta última opción daría lugar a la implementación de un sistema agroforestal que combine el desarrollo de fuste maderable de alto valor con el desarrollo del estrato herbáceo con miras a la incorporación de la producción ganadera.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Achim A., Gardiner B. and Daquitaine R. 2006. Predicting the branching properties of Sitka Spruce grown in Great Britain. *New Zealand Journal of Forestry Science* 36:246-264.
- Adegbidi H. G., Jokela E. J., Comerford N. B. and Barros N. F. 2002. Biomass development for intensively manager Loblolly pine plantations growing on Spodosols in the Southeastern USA. *Forest Ecology and Management* 167:91-102
- Beadle, C. 1997. Dynamics of leaf and canopy development. In: Nambiar E. Z., Brown A. G. (ed.) *Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests*. ICIAR, Canberra, pp 169–212.
- Beaulieu E., Schneider R., Berninger F., Huor Ung C. and Swift E. 2011. Modeling Jack pine branch characteristics in Eastern Canada. *Forest Ecology and Management* 262:1748–1757.
- Bernardo A., Reis M. L., Reis G. F., Harrison R. G. and Firme D. J. 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita*, *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and management*. 104: 1 – 13.
- Burgos J. J. 1970. El clima de la región Nordeste de la República Argentina en relación con la vegetación natural y el suelo. *Separata del Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. Vol. XI. Pp. 37-102.

- Cabrera A. L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. En Kugler W F (Ed.) Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería. Tomo 2. 2ª edición. Acme. Buenos Aires. Argentina. Fascículo 1. 85 pp.
- Caldwell M, Meister H, Tenhunen J and Lange O. 1986. Canopy structure, light microclimate and leaf gas exchange of *Quercus coccifera* L. in a Portuguese macchia: measurements in different canopy layers and simulations with a canopy model. *Trees* 1:25–41.
- Cannell M. 1989. Physiological basis of wood production: a review. *Scand J For Res* 4:459–490.
- Didion M., Kaufmann E. and Thürig E. 2014. Impacts of forest management on carbon stock changes in litter and soil in Swiss forests. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf. Published on the Internet. Available in: www.bafu.admin.ch/climatereporting. Active in December 2015.
- Di Rienzo J. A., Guzmán, A. W. and Casanoves, F. A. 2002. Multiple Comparisons Method based on the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environment Statistics* 7(2): 1–14.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Fassola H. E., Crechi E. H., Barth S. R., Keller A. E., Winck R. A. y Videla D. 2012. Análisis de las diferencias de partición de biomasa aérea entre *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (f2) y de *Pinus taeda* para el norte de Misiones, Argentina. XV Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM – INTA EEA Montecarlo. Eldorado, Misiones, Argentina. 8 pp.
- Fassola H., Crechi E., Barth S., Keller A., Winck R., Martiarena R., Von Wallis A., Pinazo M. A. y Knebel O. 2010. Modelos regionales de biomasa aérea de *Pinus taeda* para Misiones y NE de Corrientes, Argentina. XIV Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. 11 pp.
- Fassola H., Moscovich F., Domecq C., Ferrere P., Lacorte S., Hampel H., maletti C. Y Alegranza D. 2004. Regulación de la densidad en rodales de *Grevillea robusta* A. Cunn. para la producción de madera de calidad y forraje en el sur de la provincia de Misiones. Ediciones INTA. RIA 33(1):15-38.
- Gerrand A. M., Neilsen W. A. and Medhurst J. L. 1997. Thinning and pruning *Eucalyptus* plantations for sawlog production in Tasmania. *Tasforests* 9:15–34.
- Henskens F. L., Battaglia M., Cherry M. L. and Beadle C. L. 2001. Physiological basis of spacing effects on tree growth and form in *Eucalyptus globulus*. *Trees* 15:365–377.

- Herrera M, Del Valle J. and Orrego S. 2001. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de C en Ecosistemas Forestales. Chile. 18 pp.
- INTA Centro Regional Misiones. 2013. Base de datos agrometeorológicos años 1994 a 2012. Estación Zaimán. Posadas. Misiones. Argentina. Responsable: Olinuck J. A.
- IRAM 9544. 1973. Norma para métodos de determinación de densidad aparente en maderas. Instituto Argentino de Racionalización de materiales. 10 pp.
- Jandl R., Alm J., Vesterdal L., Olsson M., Weiss P., Sjögersten S., Rodeghiero M., Leifeld J., Hagedorn F., Bellamy P. and Baritz R. 2011. Soil Carbon in Sensitive European Ecosystems: From Science to Land Management – A Summary. In R. Jandl, M. Rodeghiero, and M. Olsson, editors. Soil Carbon in Sensitive European Ecosystems. John Wiley and Sons, Ltd. Pp. 267-281.
- Köhl M., Magnussen S. and Marchetti M. 2006. Sampling Methods, Remote Sensing and GIS. Multiresource Forest Inventory. Ed. Springer. Berlin. Heidelberg. Serie Tropical Forestry. Pp. 17-69.
- Kuppers M. 1994. Canopy gaps: competitive light interception and economic space filling – a matter of whole plant allocation. In: Caldwell M, Pearcy R (eds) Exploitation of environmental heterogeneity by plants. Academic Press, San Diego. Pp. 111–144.
- Mäkela A. 1997. A Carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. Forest Science 43:7-23.
- Marilou B, Messier C. and Leduc A. 2004. Understorey light profiles in temperate deciduous forests: recovery process following selection cutting. Journal of Ecology 92: 328-338.
- Martiarena R. A. 2008. Cuantificación y evaluación del contenido de fósforo exportado en plantaciones de *Pinus taeda* conducido con diferentes intensidades de raleo y alternativos sistemas de cosecha. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Misiones. Argentina. 87 pp.
- Martiarena R. A., Pinazo M. A., Von Wallis A., Knebel O. y Pahr N. M. 2011. Alternativas de manejo para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 29(1): 39-48.
- Nambiar E. K. S. 1985. Critical processes in forest nutrition and their importance for management. In: Research for Forest Management. (Eds. Landsberg, J. J. and Parsons, W.). CSIRO. Melbourne. Australia. Pp. 52 – 72.
- Nave L. E., Vance E. D., Swanston C. W. and Curtis P. S. 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. Forest Ecology and Management 259:857-866.

- Neilsen, W. A. and Gerrand A. M. 1999. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacings and the effect on final crop selection. *Forest Ecology and management* 123: 217 – 229.
- Prasad J. V. N. S., Korwar G. R., Rao K. V., Mandal U. K., Rao G. R., Srinivas I., Venkateswarlu B., Rao S. N. and Kulkarni H. D. 2011. Optimum stand density of *Leucaena leucocephala* for Wood production in Andhra Pradesh, Southern India. *Biomass and bioenergy* 35: 227–235.
- Pinkard E. A., Neilsen B. 2003. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: Implications for thinning. *Forest Ecology and management* 172: 215 - 227.
- Rocha B. e Della R. M. 1987. Efeito do espaçamento na produção em peso e na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* a os 52 meses de idade. *Revista Árvore* 11(2):132-145.
- Rodríguez E, Cardoza A., Ruiz Días M. y Prado D. E. 2004 Los bosques nativos misioneros: estado actual de su conocimiento y perspectivas. En: *Ecología y Manejo de los bosques de Argentina*. Editores: Arturi M., Frangi J., Goya. J. La Plata: EDULP. 33 pp.
- Rusch V., Vila A. y Marqués B. 2008. Conservación de la biodiversidad en sistemas productivos. *Forestaciones del Noroeste de la Patagonia*. Ediciones INTA. Bariloche. Argentina. 89 pp.
- Schlegel B., Gayoso J. y Guerra. J. 2000. Manual de procedimientos. Muestreos de biomasa forestal. Proyecto FONDEF D98I1076: medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Pp. 7–9.
- Schönau A. and Coetzee J. 1989. Initial spacing, stand density and thinning in Eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 29:245–266.
- Teobaldelli M., Somogyi Z., Migliavacca M. and Usoltsev V. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management* 257:1004–1013.
- Valladares F. 1999. Architecture, ecology and evolution of plant crowns. In: Pugnaire V (ed) *Handbook of functional plant ecology*. Dekker, New York, pp. 121–194.
- Wang F., Kang M. Z., Lu Q., Letort V., Han H., Guo Y., De Reffye P. and Li B. G. 2011. A stochastic model of tree architecture and biomass partitioning: application to Mongolian Scots pines. *Annals of Botany* 107:781–792.
- Winck R. A., Fassola H. E., Barth S. R., Crechi E. H., Keller A. E., Videla D. y Zaderenko C. 2015. Modelos predictivos de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* para el noreste de Argentina. 2015. *Revista Ciência Florestal*. 25 (3): 595-606.

Zobel B. and Van Buijtenen B. 1989. Wood variation: its causes and control. Springer Verlag. Nueva York. 363 pp.

MODELO DE PREDICCIÓN DE BIOMASA

INTRODUCCIÓN

La estimación de la biomasa forestal es importante en el marco de la política mundial de mitigación de los efectos del cambio climático, estando estas acciones vinculadas a procesos que surgen a partir del protocolo de Kioto y períodos posteriores (Paladinic *et al.*, 2009; Mc Kinley *et al.*, 2011).

Un mejor conocimiento del potencial de los productos maderables obtenidos de la masa forestal interesa tanto desde el punto de vista económico como ambiental. La importancia de las estimaciones de volúmenes de biomasa para el manejo de recursos maderables y no maderables es reconocida para mejorar la planificación, la gestión sostenible y el seguimiento de cambios en las existencias de carbono almacenado en las forestaciones. Se define a la biomasa como la masa de material o tejidos vegetales, expresada en término del peso seco de los distintos compartimentos de la masa forestal (Coombs *et al.*, 1988). La biomasa es ampliamente empleada como indicador del efecto de factores externos sobre la planta y la productividad del rodal (luz, humedad, manejo silvícola (tales como densidad de plantación, poda y raleo, entre otros).

Mediciones a nivel individual de dap y h permiten estimar la biomasa forestal a través de ecuaciones alométricas desarrolladas a partir de métodos destructivos y pesaje de los distintos componentes vegetales para la obtención de su peso seco (Eamus *et al.*, 2000; Zianis and Mencuccini, 2004 y 2005; Zianis *et al.*, 2011). Si bien este proceso inicialmente conlleva un elevado costo, es esencial a fin de proporcionar las bases indispensables para la aplicación a mayor escala (grandes superficies) a través de técnicas de teledetección (Goetz *et al.*, 2009; Houghton *et al.*, 2009).

Desde el punto de vista biológico es importante que un modelo de predicción de biomasa arbórea total garantice la aditividad de todos sus componentes (Carvalho y

Parresol, 2003; Boca *et. al.*, 2011). Desde el punto de vista estadístico los componentes en forma individual (hojas, ramas, fuste, corteza) suelen estar altamente correlacionados, lo cual dificulta la modelización aditiva simultánea con métodos tradicionales. En 1962, Zellner publicó el método SUR (Seemingly Unrelated Regression) como una generalización del modelo lineal que se compone de varias funciones en el que cada ecuación es válida por sí misma y puede o no ser estimada por separado, por lo que el sistema se llama “aparentemente no relacionado”. Los términos de error estarán correlacionados si se ajusta cada ecuación por separado empleando el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS). Si bien las estimaciones son consistentes, no son tan eficientes como a través del método SUR, que utiliza mínimos cuadrados generalizados factibles con una forma específica de la matriz varianza-covarianza. Cuando las ecuaciones presentan el mismo conjunto de variables regresoras, el método SUR es recomendable. A fin de aplicar estas técnicas en la modelización de la biomasa es de utilidad el paquete Systemfit del software R publicado por Henningsen & Hamann (2007), que ajusta el sistemas de ecuaciones lineales en forma simultánea y aditiva.

Si bien, dada su importancia, al estudiar almacenamiento de carbono sería de interés considerar también a la biomasa subterránea (Guerra *et al.*, 2005; Gárate y Blanco, 2013), esta no fue tomada en cuenta en el presente trabajo por cuestiones operativas y económicas que dificultan su evaluación. Por ello se analizó biomasa extraíble y remanente directamente vinculadas a las operaciones de aprovechamiento de la población forestal. El objetivo del presente trabajo fue ajustar modelos de estimación de biomasa aérea (hojas, ramas, fuste, corteza y biomasa total) garantizando la aditividad de los componentes de biomasa aérea, comparándolos con los modelos tradicionalmente empleados en el área de biometría forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos empleados en el ajuste de los modelos de predicción de biomasa provienen del estudio de compartimentalización de biomasa analizado en el capítulo anterior.

Se analizó la correlación entre la biomasa, las dimensiones de los individuos y la densidad de plantación (tratamiento). La correlación fue menor entre biomasa total por hectárea y densidad de plantación (0,53) que entre dicha biomasa y dap (0,88), en ambos casos para un p-valor de 0,0001. Al no presentarse diferencias altamente significativas en biomasa total entre tratamientos, con excepción al de menor espaciamiento (Barth *et al.*, 2016), se ajustó un solo modelo de biomasa para todas las densidades de plantación.

Los modelos ajustados de forma simultánea para cada componente fueron previamente seleccionados entre los reportados comúnmente en la literatura (Burkhart, 2012), que son presentados en Tabla 3.1. Las variables explicativas fueron el diámetro a 1,30 m expresado en cm (dap) y altura del árbol en m (h), los rangos de la muestra de trabajo y de validación son presentados en la Tabla 3.2. La muestra de validación provino de un ensayo de intensidad y oportunidad de raleo de 14 años de edad (Crechi *et al.*, 2008). A fin de equiparar las condiciones de manejo a las de la muestra de ajuste, en la validación se emplearon los datos del tratamiento testigo, sin raleo. Dicho ensayo tenía 3 repeticiones por tratamiento. La muestra destructiva de validación para estudio de biomasa estuvo compuesta por 12 individuos seleccionados al azar. Para este último procedimiento el error se calculó como:

$$E (\%) = ((\text{valor observado} - \text{valor estimado}) / \text{valor observado}) * 100 \quad 3.1$$

Los componentes de biomasa estudiados (variable dependiente Y) fueron: biomasa de hojas, biomasa de ramas, biomasa de corteza, biomasa del fuste y biomasa total, todas expresadas en kilogramos por individuo. Los valores máximos, mínimos y promedios de las variables descriptoras de los datos considerados en el ajuste de modelos y en la validación se presentan en la Tabla 3.3. Se aplicaron transformaciones logarítmicas de las variables dependientes e independientes para lograr la homogeneidad de las varianzas y linealizar los modelos. Una vez realizadas las estimaciones se seleccionó aquel modelo que mejor ajustaba para cada componente de biomasa en función de la significancia de los estimadores, los valores de R^2 ajustado (coeficiente de determinación ajustado) y del MSE (error estándar).

Tabla 3.1. Modelos evaluados para estimar los distintos componentes de biomasa

Modelo	Ecuación
1	$\ln(y) = \beta_{01} + \beta_{11} * \ln(\text{dap}) + \varepsilon$
2	$\ln(y) = \beta_{02} + \beta_{12} * \ln(\text{dap}) + \beta_{22} * \ln(h) + \varepsilon$
3	$\ln(y) = \beta_{03} + \beta_{13} * \ln(\text{dap}) + \beta_{23} * \ln(\text{dap}^2 * h) + \varepsilon$
4	$\ln(y) = \beta_{04} + \beta_{14} * \ln(\text{dap}^2 * h) + \varepsilon$

Tabla 3.2. Valores promedio, mínimos y máximos de dap y altura total observados

	Valores descriptivos de las variables predictoras empleadas en el ajuste de los modelos		Valores descriptivos de las variables predictoras empleadas en la muestra de validación	
	dap (cm)	h (m)	dap (cm)	h (m)
Promedio	21,40	16,56	26,55	19,35
Mínimo	11,50	8,00	17,43	16,99
Máximo	40,00	21,25	34,60	20,51

Tabla 3.3. Estadísticas descriptivas de los componentes de biomasa (kg)

Compartimento	Valores descriptivos de las variables de respuesta empleadas en					
	el ajuste de los modelos			la muestra de validación		
	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo
Biomasa hojas	12,02	1,43	29,19	5,41	1,59	8,74
Biomasa ramas	56,88	5,06	198,72	31,211	8,91	54,47
Biomasa corteza	26,52	3,81	66,50	16,59	7,82	22,30
Biomasa fuste	198,72	29,91	470,21	167,17	73,88	234,09

En una segunda etapa se procedió al ajuste simultáneo de un modelo que considerara todos los componentes de biomasa bajo un sistema de ecuaciones que se representa en forma matricial según la ecuación 3.1:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad 3.1.$$

Donde,

Y= la matriz de p variables de respuesta dependientes,

X= la matriz de incidencia para cada variable independiente,

β = vector de efectos a estimar,

ε = el vector de errores aleatorios y se asume que su distribución es Normal Multivariada según la forma:

$$(0, \Sigma \otimes I_{(N)}) \quad 3.2$$

Zellner (1962) formuló las regresiones aparentemente no relacionadas (SUR), como p ecuaciones de regresión, con posibles correlaciones entre los términos de error de las mismas. El modelo SUR se explicitó según el sistema matricial 3.3:

$$E(Y) = \begin{bmatrix} \hat{y}_{(b\text{foliar})} \\ \hat{y}_{(br)} \\ \hat{y}_{(bc)} \\ \hat{y}_{(bf)} \\ \hat{y}_{(bt)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{(b\text{foliar})} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X_{(br)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{(bc)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X_{(bf)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{(bt)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_{(b\text{foliar})} \\ \beta_{(br)} \\ \beta_{(bc)} \\ \beta_{(bf)} \\ \beta_{(bt)} \end{bmatrix} = D * B; \quad 3.3$$

El vector de coeficientes se estimó utilizando la fórmula:

$$\hat{B} = [D' Q^{-1} D]^{-1} [D' Q^{-1} Y]; \quad 3.4$$

donde Q es la matriz de ponderación basada en las covarianzas de las Y variables, según la ecuación 3.5. D es la matriz de incidencia (a cuyos elementos anteriormente se mencionó como X) y B es el vector de coeficientes a estimar (β).

$$Q = \hat{\Sigma} \otimes I_N. \quad 3.5$$

Los elementos de la matriz $\hat{\Sigma}$ de la ecuación 3.5 se calcularon como muestra la ecuación 3.6:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{(N - df^*)} y' [I_N - H_i] [I_N - H_j] y_j; \quad 3.6$$

Donde, $H_j = X_j (X_j' X_j)^{-1} X_j'$. Como puede verse los modelos SUR son una aplicación particular de los modelos lineales generalizados.

Ajuste por transformación. Dadas las transformaciones logarítmicas aplicadas, se estimó un factor de corrección según la ecuación 3.7 con el objetivo de eliminar la asimetría en la distribución que se produce en el proceso de transformación inversa, que se da al utilizar la transformación logarítmica (Meyer 1941). Dicho factor de corrección se aplica a los resultados obtenidos con el empleo del modelo.

$$K = e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad 3.7.$$

Donde, K= coeficiente de corrección de la discrepancia y σ^2 = varianza.

Los cálculos se realizaron en un entorno R (R Development Core Team, 2012), aplicando las funciones de los paquetes *systemfit* (Henningsen y Hamann, 2007) y *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2011).

Se consideró como mejor modelo de predicción de biomasa para cada uno de los compartimentos, al que presentó el mayor coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y el menor error estándar (MSE).

A los fines de comprobar si el modelo elegido era adecuado, se verificó la bondad del ajuste contra sus propios datos. Para ello se contrastaron los valores de biomasa observados versus los predichos determinándose el error porcentual y se efectuó el test de regresión lineal entre valores de biomasa observados y predichos. En este último test si el modelo es bueno, la regresión coincide con la bisectriz del primer cuadrante, contrastándose mediante la prueba de F con un nivel de significación $\alpha=0,05$, la hipótesis nula de que el intercepto es = 0 y la pendiente = 1 en forma simultánea (Huang *et al.*, 2003). Finalmente, se evaluó la validez de los modelos con datos disponibles de una muestra independiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Si bien los datos empleados en este trabajo provinieron de un ensayo de densidad de plantación, la biomasa resultó estar más correlacionada a variables dendrométricas del árbol individual (0,9) que al tratamiento en sí, densidad de plantación (0,3). Esto permitió el ajuste de un solo modelo de predicción de biomasa independientemente de la densidad de plantación. En la Figura 3.1 se ilustra la relación entre las variables independientes diámetro a altura de pecho (dap) y altura total (h) y las variables dependientes: biomasa foliar, de ramas, de corteza y de fuste. El dap es un parámetro que explica satisfactoriamente la variabilidad de la biomasa en diferentes compartimentos del árbol, como así también, las variables dasométricas que muestran el estado del rodal (Zianis y Mencuccini, 2005; Saint-andrè *et al.*, 2005; Cole y Ewel, 2006; Ferrere *et al.*, 2008).

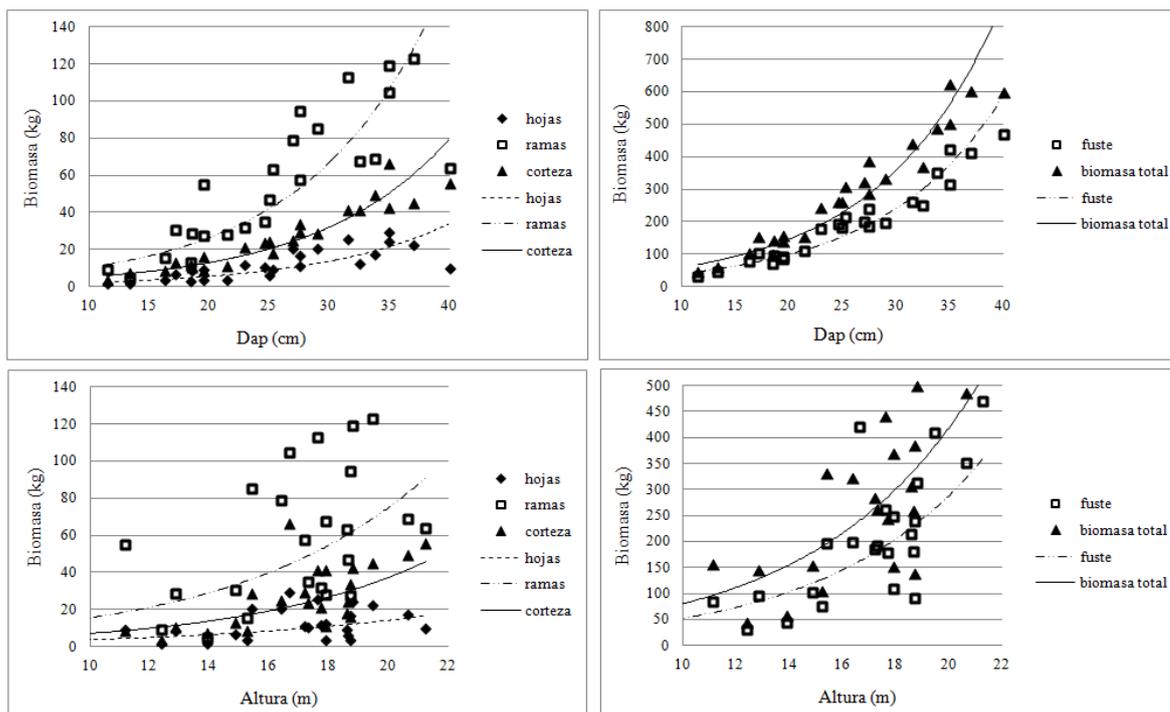


Figura 3.1. Relación entre el diámetro a la altura del pecho y altura total con la biomasa foliar, biomasa de ramas, biomasa de corteza, biomasa de fuste y biomasa total. (Las líneas ilustran la tendencia de las relaciones consideradas)

Las asociaciones analizadas fueron aceptables, no obstante en la biomasa de ramas y fuste en relación a la altura total la asociación fue de menor intensidad.

En el ajuste de modelos independientes para cada compartimento de biomasa (Tabla 3.4), el modelo 2 fue el de mejor desempeño en corteza y fuste y el modelo 3 en hojas y ramas.

Tabla 3.4. Valores estimados de los distintos parámetros de los modelos propuestos para estimación de biomasa y sus coeficientes de ajuste

	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_{\ln(\text{dap})}$	$\hat{\beta}_{\ln(\text{h})}$	$\hat{\beta}_{\ln(\text{dap}2.\text{h})}$	R ² ajustado	MSE	Modelo
ln(biomasa hojas)	-5,00	2,26			0,74	0,45	1
	-4,28	2,48	-0,51		0,75	0,46	2
	-8,40	4,10		-0,09	0,76	0,44	3*
	-0,55			0,09	0,63	0,54	4
ln(biomasa ramas)	-3,15	2,16			0,75	0,42	1
	-3,05	2,20	-0,07		0,75	0,42	2
	-5,14	3,24		-0,05	0,76	0,42	3*
	1,06			0,09	0,67	0,48	4
ln(biomasa corteza)	-3,91	2,18			0,93	0,20	1
	-4,17	2,10	0,18		0,94	0,20	2*
	-3,29	1,85		0,02	0,93	0,20	3
	0,24			0,10	0,90	0,24	4
ln (biomasa fuste)	-1,77	2,15			0,94	0,20	1
	-4,17	2,10	0,18		0,96	0,15	2*
	-3,29	1,85		0,02	0,93	0,20	3
	0,24			0,10	0,90	0,24	4

* Modelo seleccionado

Seleccionado el modelo más adecuado para la estimación de biomasa por cada compartimento se procedió al ajuste simultáneo de los modelos.

Bajo el ajuste simultáneo de los modelos seleccionados los valores de los parámetros resultaron similares en todos los compartimentos al comparar los estimadores OLS y SUR (Tabla 3.5), excepto para biomasa total donde con estimadores SUR se obtiene un menor valor de MSE en comparación al hallado con estimadores OLS, además se registró una reducción en los intervalos de confianza al utilizar la metodología SUR respecto a OLS (Tabla 3.5).

Boca *et al.* (2011) estudiando la predicción de biomasa aérea para *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, si bien redujeron levemente los intervalos de confianza de los estimadores SUR respecto a los OLS, garantizaron las propiedades de aditividad de los componentes de la biomasa.

Tabla 3.5. Valores estimados de los distintos parámetros para el mejor modelo seleccionado bajo métodos OLS y SUR en cada compartimento de biomasa aérea

Compartimento	Método	OLS						SUR					
		Coefficiente	LI	LS	Rango	R ² ajustado	MSE	Coefficiente	LI	LS	Rango	R ² ajustado	MSE
Biomasa foliar													
	β 0	-8,40	-13,27	-3,53	9,70	0,74	0,44	-7,33	-11,13	-3,53	7,60	0,74	0,44
	β 1 ln(dap)	4,10	1,59	6,62	5,00			3,52	1,63	5,41	3,80		
	β 2 ln (dap ² *h)	-0,08	-0,20	0,03	0,20			-0,05	-0,14	0,02	0,20		
Biomasa ramas													
	β 0	-5,14	-9,75	-0,54	9,20	0,74	0,42	-4,12	-7,20	-1,05	6,20	0,74	0,42
	β 1 ln(dap)	3,24	0,87	5,62	4,70			2,69	1,21	4,17	3,00		
	β 2 ln (dap ² *h)	-0,05	-0,16	0,06	0,20			-0,02	-0,09	0,40	0,50		
Biomasa corteza													
	β 0	-4,17	-5,28	-3,07	2,20	0,93	0,20	-4,21	-5,30	-3,11	2,20	0,93	0,20
	β 1 ln(dap)	2,10	1,76	2,45	0,70			2,09	1,76	2,43	0,70		
	β 2 ln (h)	0,18	-0,32	0,69	1,00			0,21	-0,30	0,71	1,00		
Biomasa fuste													
	β 0	-2,34	-3,10	-1,58	1,50	0,96	0,14	-2,36	-3,11	-1,61	1,50	0,96	0,14
	β 1 ln(dap)	1,97	1,74	2,21	0,50			1,97	1,73	2,20	0,50		
	β 2 ln (h)	0,41	0,06	0,76	0,70			0,4205	0,08	0,76	0,7		
Biomasa total													
	β 0	-1,74	-2,54	-0,94	1,60	0,96	0,42	-1,71	-2,44	-0,98	1,50	0,96	0,14
	β 1 ln(dap)	2,06	1,81	2,30	0,50			2,06	1,84	2,29	0,50		
	β 2 ln (h)	0,23	-0,14	0,60	0,70			0,21	-0,07	0,50	0,60		

Como los modelos están afectados por la transformación logarítmica, en el proceso de validación, los errores de los mismos fueron calculados en sus unidades originales a través del coeficiente de discrepancia logarítmica de Meyer cuyos valores se presentan en Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Coeficientes de discrepancia logarítmica de modelos de predicción de biomasa por compartimento

Componente de biomasa	Coeficiente de discrepancia logarítmica
Biomasa de hojas	1,1017
Biomasa de ramas	1,0922
Biomasa de corteza	1,0202
Biomasa de fuste	1,0098
Biomasa total	1,0098

Calculado el error del ajuste del modelo seleccionado (contrastando contra sus propios datos) se concluyó que su desempeño es muy aceptable (Figura 3.2). En este procedimiento, biomasa foliar arrojó un error promedio de - 2,72 %; biomasa de ramas, - 3,45 %; biomasa de corteza, 0,36 %, biomasa de fuste, 0,16 % y biomasa total presentó un error de 0,03 %. Pudo observarse además en la representación de los modelos de la Figura 3.2 que las pendientes son cercanas a 1 y los interceptos cercanos a cero, hecho que comprobó la bondad de ajuste alcanzada.

Validados los modelos ajustados contra la muestra independiente, biomasa foliar arrojó un error promedio de -13,95 %; biomasa de ramas -1,63 %; biomasa de corteza - 11,41 %, biomasa de fuste 12,67 % y biomasa total presentó un error de 1,01 %.

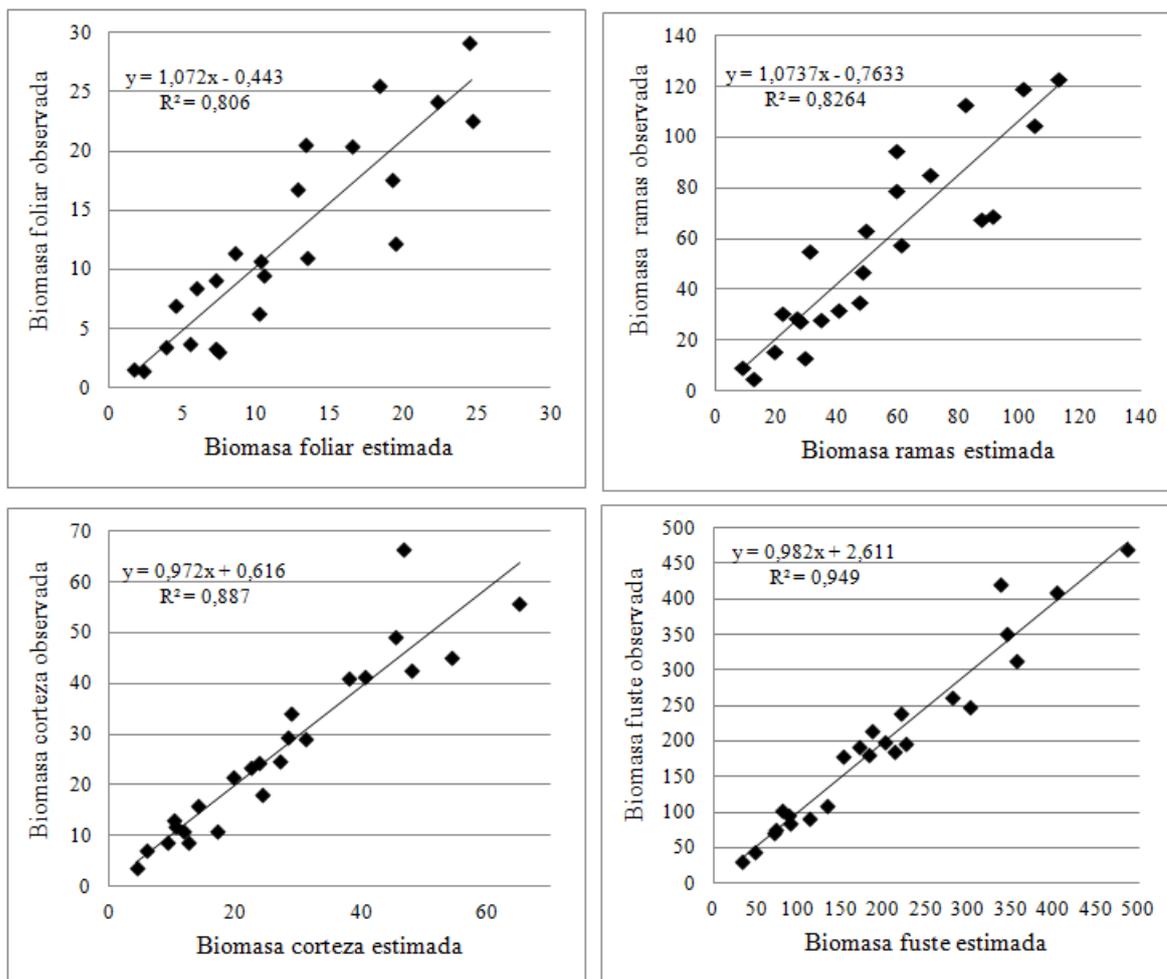


Figura 3.2. Valores de biomasa observados versus predichos utilizando las variables predictoras diámetro a altura de pecho (1,30 m) y altura (h)

Si bien los modelos que incorporan como variables predictoras el dap y la h suelen ser mejores (Brown *et al.*, 1989; Brown, 1997; Overman *et al.*, 1994; Araujo *et al.*, 1999; Schroeder *et al.*, 1997), no siempre es posible aplicarlos con los datos disponibles. Los modelos de determinación de biomasa ajustados a partir del dap como única variable independiente tienen la ventaja de que la mayoría de los inventarios forestales incluyen la medición de dicha variable. Por este motivo, si bien la predicción presenta un mayor nivel de error, se presentan los valores obtenidos con dicho modelo (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Valores estimados para el modelo que utilizó diámetro a altura de pecho (1,30 m) como única variable predictora

Compartimento	Coefficiente	LI	LS	Discrepancia logarítmica	R ² ajustado	MSE
Biomasa foliar						
$\beta 0$	-5,00	-6,92	-3,08	1,10656	0,72	0,45
$\beta 1 \ln(\text{dap})$	2,26	1,66	2,86			
Biomasa ramas						
$\beta 0$	-3,15	-4,91	-1,40	1,09220	0,74	0,42
$\beta 1 \ln(\text{dap})$	2,16	1,62	2,71			
Biomasa corteza						
$\beta 0$	-3,91	-4,74	-3,09	1,02020	0,93	0,20
$\beta 1 \ln(\text{dap})$	2,18	1,93	2,44			
Biomasa fuste						
$\beta 0$	-1,77	-2,40	-1,13	1,01131	0,96	0,15
$\beta 1 \ln(\text{dap})$	2,15	1,95	2,35			
Biomasa total						
$\beta 0$	-1,41	-2,02	-0,79	1,00984	0,96	0,15
$\beta 1 \ln(\text{dap})$	2,16	1,96	2,35			

Se presenta tan solo el ajuste simultáneo de este modelo a través del método SUR ya que no se evidenciaron diferencias entre ambos procedimientos, con excepción del MSE de biomasa total que pasó de 0,45 (OLS) a 0,15 (SUR). Esto puede deberse a una sub-parametrización del modelo al reducirse el mismo a una sola variable predictora.

Calculado el error de ajuste de los modelos (contrastando contra sus propios datos) se consideró que su comportamiento es aceptable, resultando las pendientes de las rectas ajustadas entre valores observados y predichos cercanas a 1 (Figura 3.3). Estimada a través

de la función ajustada, la biomasa foliar arrojó un error promedio de - 8,59 %, la biomasa de ramas -9,11 %, la biomasa de corteza - 3,88 %, la biomasa de fuste -2,18 % y para la biomasa total 0,03 %.

Validados los modelos ajustados contra la muestra independiente, biomasa foliar presentó un error promedio de -16,67, biomasa de ramas -4,30 %, biomasa de corteza -7,34 %, biomasa de fuste 15,49 % y biomasa total mostró un error de 9,91 %.

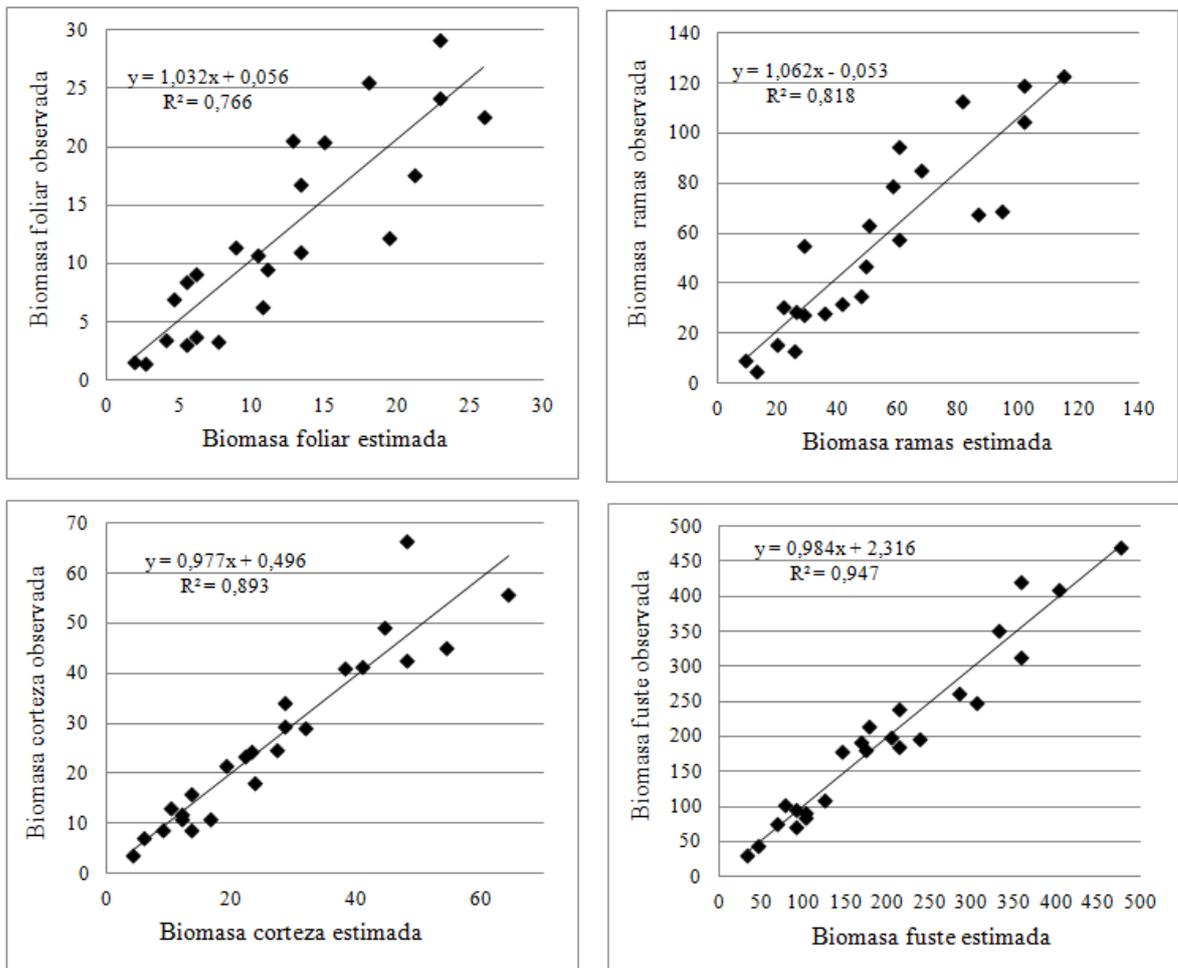


Figura 3.3. Valores de biomasa observados versus predichos en base al modelo de mejor ajuste. Variable predictora diámetro a altura de pecho (dap)

Realizada una comparación entre el modelo ajustado con las variables predictivas dap y altura versus el modelo con dap como única variable independiente, se recomienda el

empleo del modelo 3 descrito en la Tabla 3.1. Sus correspondientes valores de error de estimación son presentados en Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Error de estimación calculado en base a validación contra muestra independiente de modelos con una y dos variables predictoras. Valor expresado en %

Variables predictivas	Biomasa de				
	hoja	rama	corteza	fuste	total
dap y altura	-13,95	-1,634	-11,41	12,67	1,01
dap	-16,67	-4,3	-7,34	15,49	9,91

En la aplicación de todos los modelos considerados debe tenerse en cuenta su empleo dentro del rango diamétrico considerado en el presente trabajo (Tabla 3.2).

En coincidencia con lo encontrado por Russell (2008) para *Pinus taeda*, y Boca *et al.* (2011) en *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, las estimaciones SUR mejoraron los resultados de las estimaciones OLS. En el presente trabajo, la mejora fue notable particularmente en la estimación de la biomasa total. Se comprobó la razonabilidad biológica de las funciones empleadas, resultando eficientes las estimaciones de los parámetros, manteniendo la independencia y aditividad de los compartimentos de biomasa según lo recomendado por Carvalho y Parresol (2003).

Los resultados tienen aplicación directa en la determinación del potencial de una plantación de *Grevillea robusta* para la producción de productos tradicionales y no tradicionales, incluyendo la producción de biomasa para la bioenergía. También pueden ser utilizados para establecer los presupuestos de carbono y nutrientes a fin de evaluar la sostenibilidad ambiental de diferentes métodos de cosecha.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio provee una serie de modelos para la estimación de la biomasa aérea total y de sus distintos componentes para rodales de *Grevillea robusta* A., especie de la que no se dispone de información previa en este aspecto. Este conocimiento es relevante como información de base en proyectos de cuantificación del carbono.

El mejor comportamiento para la estimación de la biomasa aérea se presenta en los modelos linealizados que emplean logaritmo natural del diámetro y la altura como variable independiente.

El uso del diámetro como única variable independiente en los modelos de biomasa simplifica la recolección de datos a campo. No obstante, las estimaciones mejoran significativamente con la incorporación de la altura como variable predictora.

La distribución de la biomasa en los individuos confirma el patrón de desarrollo que se encuentra en la bibliografía para otras especies.

El análisis de la eficiencia de los modelos demuestra que si bien los datos provienen de una reducida región geográfica, asimismo es posible su empleo preliminar en cultivos de la provincia de Misiones, Argentina. Aunque los modelos obtenidos son fiables, es necesario ampliar la base de datos en cuanto a edades y distribución de sitios en el área de trabajo. Para futuros estudios de estimación de stock de carbono en el ecosistema, los relevamientos deberían incluir la biomasa subterránea (raíz) y el carbono orgánico almacenado en la materia orgánica del suelo, así como de los demás estratos del sotobosque.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Araujo T. M., Higuchi N. and Carvalho Junior J. A. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Para, Brazil. *Forest Ecology and Management* 117:43-52.
- Barth S. R., Giménez A. M., Joseau M. J., Gauchat M. E. y Fassola H. 2016. Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. IPEF. Brasil. *Revista Scientia Florestalis* 44 (111), en prensa.
- Boca R. T., Fassola H E., Crechi E. H., Barth S. R., Keller A. E. y Winck R. A. 2011. Uso de estimadores SUR para predecir biomasa aérea de *Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Actas XVI Reunión Científica del Grupo Argentino de Bioestadística (GAB) Salta. Argentina. 10 pp.
- Brown S., Gillespie A. J. R. and Lugo A. E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35: 881-902.

- Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO Forestry paper No. 134. FAO, Roma. 55 pp.
- Burkhart H. and Tomé M. 2012. Modeling Forest Trees and Stands. Springer, XIV, 476 pp.
- Carvalho J. P. and Parresol B. R. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pirenaica* Willd.). Forest Ecology and Management 179:269–276.
- Cole T. J. and Ewel J. J. 2006. Allometric equations for four valuable tropical tree species. Forest Ecology and Management 229:351–360.
- Coombs J., Hall D. L., Long S. P. y Scurlock J. M. 1988. Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad. Tercera edición. Texcoco. Editorial Futura. 259 pp.
- Crechi E., Keller A., Fassola H., Fernández R. y Moscovich F. 2008. Efectos de la intensidad de raleo sobre la producción en volumen de *Grevillea robusta* A. en el sur de Misiones, Argentina. En: 13º Jornadas Técnicas, Forestales y Ambientales. Eldorado. Misiones. Facultad de Ciencias Forestales-UNaM / EEA Montecarlo-INTA. 11 pp.
- Eamus D, Mc Guinness K. and Burrows W. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. National Carbon Accounting System. Technical Report 5 b. Australian Greenhouse Office, Canberra. 64 pp.
- Ferrere P., Lupi A., Boca T. R., Nakama V. y Alfieri A. 2008. Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill. de la Provincia de Buenos Aires, argentina. Ciência Florestal. (18) 3:291-305.
- Gárate M. y Blanco J. A. 2013. Importancia de la caracterización de la biomasa de raíces en la simulación de ecosistemas forestales. Revista Ecosistemas 22(3):66-73.
- Guerra, J.; Gayoso, J.; Schlatter, J. y Nespolo, R. 2005. Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. Revista Bosque 26(1): 5-21.
- Goetz S. J., Baccini A., Laporte N., Johns T., Walker W. S. and Kelldorfer J. M. 2009. Mapping & monitoring carbon stocks with satellite observations: A comparison of methods. Carbon Balance and Management 4(2). Publicado en internet, disponible en: <http://dx.doi.org/10.1186/1750-0680-1184-1182>. Activo en octubre de 2015.
- Henningsen A. and Hamann J. D. 2007. Systemfit: A Package for Estimating Systems of Simultaneous Equations in R. Journal of Statistical Software. Vol. 23, Issue 4. 40 pp.
- Houghton R. A., Hall F. and Goetz S. J. 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. Journal of Geophysical Research, 114, Issue G2. Publicado en internet, disponible en: <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG000935>. Activo en septiembre 2015.

- Huang S., Yang Y. and Wang Y. 2003. A Critical Look at Procedures for Validating Growth and Yield Models. En: Amaro A., Reed D., Soares P. (Eds.) Modelling Forest Systems. CABI-Publishings, Wallingford. Pp 271-293.
- Mc Kinley D.C., Ryan M. C., Birdsey R. A., Giardina C. P., Harmon M. E., Heath L. S., Houghton R.A., Jackson R. B., Morrison J. F., Murray B. C., Pataki D. E. and Skog K. E. 2011. A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States. *Ecological Applications* 21:1902–1924. Publicado en internet, disponible en: <http://dx.doi.org/10.1890/10-0697.1>. Activo en noviembre 2015.
- Meyer H. A. 1941. Correction for a systematic error occurring in the application of the logarithmic volume equation. Pennsylvania. Forest School Research. Paper 7. 3 pp.
- Overman J. P. M., Witte H. J. L. and Saldarriaga J. G. 1994. Evaluation of regression models for above ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology* 10: 207-218.
- Paladinic E., Vuletic D., Martini Y, Marjanovic H., Indir K. S., Benko M. and Novotny V. 2009. Forest biomass and sequestered carbon estimation according to main tree components on the forest stand scale. *Periodicum Biologorum* 111(4):459 – 466.
- Pinheiro J., Douglas B., Debroy S. and Sarkar D. 2011. R Development Core Team, nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3. Pp 1-124 Publicado en internet, disponible en: <http://cran.r-project.org/web/packages/nlme/>. Activo en noviembre 2015.
- R Development Core Team. 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria. Publicado en internet, disponible en <http://www.R-project.org>. Activo en enero 2016.
- Russell M. B. 2008. Modeling the biomass partitioning of loblolly pine grown in a miniature-scale plantation. Master's thesis in forestry. Virginia Polytechnic Institute and State University. 86 pp.
- Saint-André L., M' Bou A. T., Mabiala A., Mouvondy W., Jourdan C., Roupsard O., Deleporte P., Hamel O. and Nouvellon Y. 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*. 205:199 – 214.
- Schroeder P. E., Brown S.; Mo J., Birdsey R. and Cieszewski C. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the U.S. using inventory data. *For. Sci.* 11:258-264.
- Zellner, Arnold. 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regression equations and tests for aggregation bias. *Journal of the American Statistical Association* 57: 348–368. Publicado en internet, disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235726165_An_Efficient_Method_of_Estimating_Seemingly_Unrelated_Regressions_and_Tests_of_Aggregation_Bias. Activo Octubre 2015.

- Zianis D. and Mencuccini M. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management* 187:311–332.
- Zianis D. and Mencuccini M. 2005. Aboveground net primary productivity of a beech (*Fagus moesiaca* Cz.) forest: the case study of Naousa forest, northern Greece. *Tree Phys.* 25:713–722.
- Zianis D., Xanthopoulos G., Kalabokidis K., Kazakis G, Ghosn D. and Roussou O. 2011. Allometric equations for aboveground biomass estimation by size class for *Pinus brutia* Ten. trees growing in North and South Aegean Islands, Greece. *European Journal of Forest Research* 130:145–160.

COMPORTAMIENTO DENDROMÉTRICO

INTRODUCCIÓN

Grevillea robusta es utilizada en forestaciones comerciales en el nordeste y noroeste argentino. Según datos provenientes de SIFIP (2013) y de la Dirección de Recursos Forestales de Corrientes (2013), la Región Misiones y N de Corrientes cuentan en conjunto con 3000 hectáreas implantadas de *Grevillea robusta*, conocida además como roble sedoso o grevillea. Si bien la especie es implantada como acompañante a cultivos agrícolas en Kenia, Ruanda, Burundi, Brasil y Argentina, se desconoce su comportamiento frente a un manejo forestal intensivo (Lott *et al.*, 2000; Roose y Ndayizigiye, 1997; Akyeampong *et al.*, 2000; Baggio *et al.*, 1997).

El largo plazo que caracteriza a la actividad forestal incrementa la complejidad en la toma de decisiones para el manejo de la masa arbórea. Surge así la necesidad de conocer cómo modificar la producción física de la plantación para, al mismo tiempo, acrecentar su valor comercial. El producir madera de calidad en un marco de Manejo Forestal Sustentable es de importancia estratégica para el sector foresto-industrial. En consonancia con ello, se busca incorporar nuevas alternativas de cultivo a través de especies no tradicionales pero con potencialidad en la región. La elección de *Grevillea robusta* como una alternativa productiva por parte de las empresas se debe a su crecimiento relativamente rápido (en comparación al de otras especies cultivadas en la región), la adaptación a condiciones edafo-climáticas y a la presión social para el cese del aprovechamiento del bosque nativo (Fassola *et al.*, 2004; Esquivel, *et al.*, 2010).

La producción de una población forestal está influenciada por factores como el material genético empleado, condiciones edafo-climáticas y topográficas, representados en el concepto de “calidad de sitio”, la densidad inicial de plantación y los distintos tratamientos silvícolas implementados (limpieza, raleos, poda, fertilización), (Crechi, 1996). Según Daniel *et al.* (1982), la densidad de plantación es el segundo factor en importancia, después de la calidad de sitio, en la determinación de la productividad de un

rodal. Este hecho es también reconocido por Jobet (1999). El espaciamiento es uno de los principales factores que el productor forestal puede manejar en el desarrollo de su plantación. La densidad de plantación presenta un efecto significativo en el crecimiento de la masa forestal (Bailey, 1986; INFOR, 1995). Trabajando con *Eucalyptus sp.*, Montagu *et al.* (2003) destacan que la densidad de la plantación y el ritmo de crecimiento de las plantas son los principales condicionantes que determinan el momento de cierre del dosel arbóreo. A su vez, Martínez *et al.* (2006) señalan que la elección de la densidad de plantación adecuada influye en el crecimiento y condiciona las tareas de mantenimiento y aprovechamiento.

Diversos autores hacen referencia a que a mayores densidades de plantación ocurre una disminución del diámetro del árbol, con un aumento de la altura total, el área basal y el volumen total por hectárea. Este comportamiento fue observado en *Eucalyptus sp.* (Schönau y Coetzee, 1989; Bernardo *et al.*, 1998) más específicamente en *E. camaldulensis* y *E. tereticornis* (Mushove, 1991), *E. grandis* (Coetzee, 1991; Dalla-Tea, 1995 y Crechi *et al.*, 2003), *E. nitens* (Neilsen y Gerrand, 1999) y *E. globulus* (Madrigal *et al.*, 1999; Pinilla Suárez y Ulloa, 2001 y Guerra-Bugueño, 2013). También arribaron a iguales conclusiones Sharma *et al.* (2002) y Pezzutti (2011) para *Pinus taeda*.

En función a lo expuesto y tomando en cuenta la necesidad de incrementar el conocimiento disponible sobre el potencial de cultivo de *Grevillea robusta*, el presente trabajo estudió el efecto de la densidad de plantación en la evolución de las distintas variables dendrométricas de interés para el ordenador forestal. Se desarrollaron además, modelos de estimación de la producción presente y futura en área basal y volumen con corteza por hectárea en función a la densidad de plantación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con datos provenientes del ensayo de densidad de plantación de *Grevillea robusta* considerado hasta el momento en el estudio de biomasa aérea. Cabe recordar que los tratamientos considerados fueron: 1500, 750, 375 y 162 a/ha.

En el inventario de las parcelas de ensayo se consideraron las mediciones de diámetro a altura de pecho (dap) y altura total (h). Las variables área basal (G) y volumen

(Vcc) se obtuvieron por cálculo. A partir de la información obtenida se analizó el efecto de la densidad inicial de plantación sobre el diámetro (cm), la altura media (m), el área basal (m²) y el volumen total con corteza (m³/ha) de *Grevillea robusta*. A modo de caracterizar el desempeño del dap en función a la densidad de plantación se ajustó la función de probabilidad acumulada en base al modelo de Weibull (Soarez, 2006). Se efectuó un análisis comparativo entre tratamientos mediante el empleo de modelos mixtos con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015). Con motivo de evaluar la competencia entre densidades de plantación como explicación a algunas respuestas halladas, se calculó el factor de espaciamiento relativo (Wilson, 1946). Para ello se empleó la expresión:

$$FE(\%) = (\sqrt{10000/N} / \text{altura dominante}) * 100 \quad 4.1$$

Donde, FE es el factor de espaciamiento y N el número de árboles por hectárea.

Se ajustaron además modelos de crecimiento en dap y altura total a fin de evaluar diferencias de comportamiento entre las distintas densidades de plantación. Se evaluaron los modelos de Chapman-Richards, Gompertz y Monomolecular (Fassola *et al.*, 2004), eligiéndose el de mejor performance a través del valor de Akaike (AIC). Corroborada la existencia de diferencias estadísticas significativas entre tratamientos mediante la comparación de funciones de crecimiento a través de modelos lineales generalizados, se ajustaron modelos matemáticos de predicción de área basal y volumen mediante una adaptación de los modelos compatibles de crecimiento y producción de Sullivan y Clutter (1972). En la adaptación de estos modelos se consideraron como variables predictoras a aquellas que estuvieran vinculadas a la densidad de plantación a fin de su aplicabilidad en todo el rango de densidades consideradas.

La aptitud de los modelos elegidos se verificó con la bondad del ajuste contra sus propios datos. Para ello se efectuó una regresión lineal entre valores de biomasa observados y predichos. En este test, si el modelo es bueno, la regresión coincide con la bisectriz del primer cuadrante, contrastándose mediante la prueba de F, con nivel de significancia del 5 %, la hipótesis nula de que el intercepto es = 0 y la pendiente = 1 en forma simultánea (Huang *et al.*, 2003). La validación del modelo se efectuó con datos disponibles de una muestra independiente proveniente de un ensayo de intensidad y oportunidad de raleo de 16 años de mediciones sucesivas (Crechi *et al.*, 2008). A fin de la

comparabilidad de las situaciones se consideraron los valores provenientes del tratamiento testigo, sin raleo. Para este último procedimiento el error se calculó como:

$$\text{Error} = ((\text{valor observado} - \text{valor estimado}) / \text{valor observado}) * 1004.2$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura

Tal lo esperado según antecedentes bibliográficos para distintas especies cultivadas (Schumacher, 1930; Reismann, 1983), la altura de los 100 individuos de mayor diámetro por altura no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los 375 y los 1500 a/ha. Dicha diferencia sí se presentó entre éstas densidades y 162 a/ha (Figura 4.1).

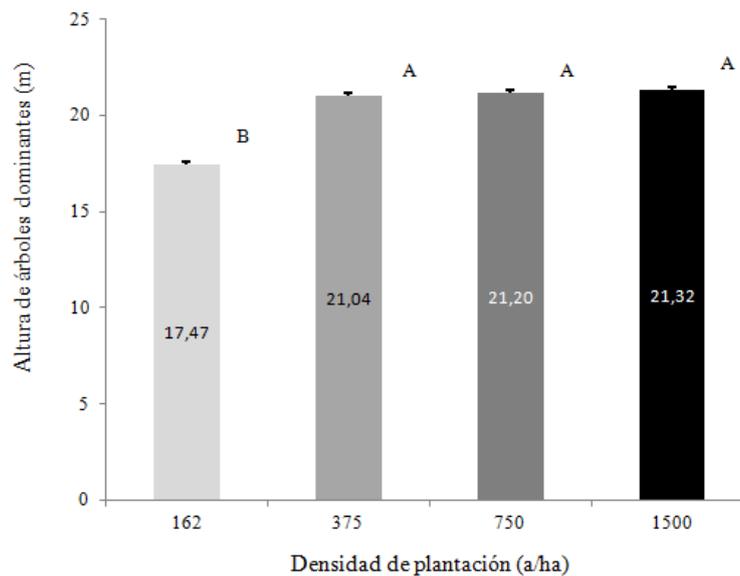


Figura 4.1. Altura dominante según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

La altura dominante es aceptada generalmente como indicadora de la calidad de sitio de una especie forestal porque guarda una estrecha relación con la producción en volumen, dentro de ciertos límites de densidad normales (Reismann, 1983; Patrone, 1963). A 162

a/ha el dosel nunca alcanzó un estado de competencia para procurar altura en busca de luminosidad. Esto hizo que la altura dominante fuera menor para este espaciamiento, que se hallaría fuera del rango citado por Reismannn (1983), Assman (1970) y otros investigadores como normal o dentro de los límites del área basimétrica óptima para una determinada área. Por otro lado, al analizar los resultados encontrados en la variable altura media (Figura 4.2), se observó una relación directa de la altura media con la densidad de plantación. Esto se debe a la competencia desarrollada por la búsqueda de luz, máxime al ser *Grevillea robusta* una especie catalogada como heliófita (Ferreira y Martins, 1998). Un caso particular se dio a 750 a/ha, la densidad que mejor aprovecha la potencialidad brindada por los recursos disponibles. Podría considerarse que es el punto de inflexión entre un estado de competencia y una adecuada ocupación del sitio.

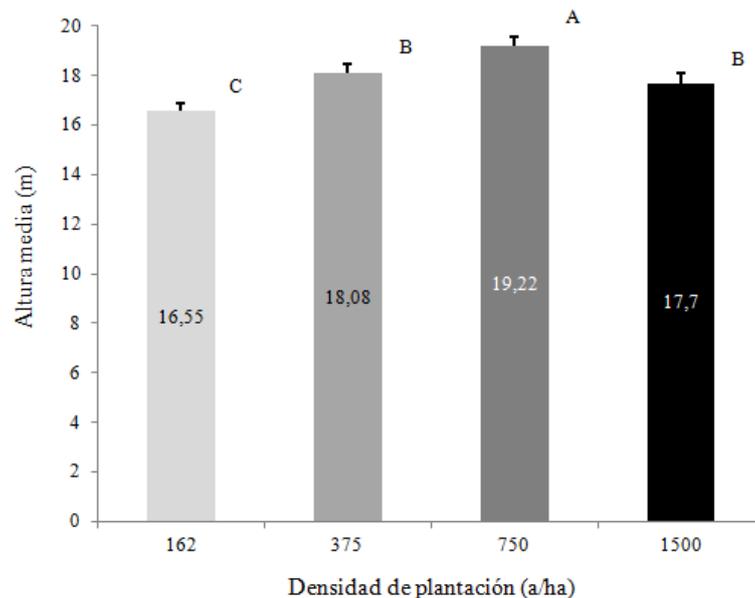


Figura 4.2. Altura media según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Realizado el análisis de la evolución de altura total del rodal a través del tiempo (Figura 4.3, Tabla 4.1), el desarrollo entre las distintas densidades de plantación presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

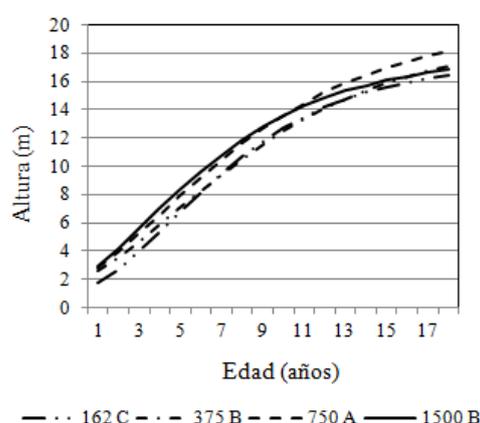


Figura 4.3. Evolución de altura total según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Tabla 4.1. Coeficientes y estadísticos de las funciones para altura según el modelo de Chapman-Richards ($\text{altura} = \alpha \cdot (1 + \beta \cdot \exp(-\gamma \cdot \text{Edad}))^\delta$)

parámetros	árboles por hectárea			
	162	375	750	1500
α	17,46	19,27	19,91	17,74
β	-0,24	-0,25	-0,29	-0,26
γ	0,21	0,16	0,17	0,2
δ	10,74	8,42	6,97	7,45

Diámetro

Si se considera el dap con corteza (diámetro a 1,30 m), se puede observar que los tratamientos de menor densidad de plantación superaron en diámetro ($P < 0,05$) a los de mayor densidad de plantación (Figura 4.4). *Grevillea robusta* siguió un patrón de comportamiento común a muchas especies implantadas, según el cual, a mayor espaciamiento, ante una mejor asignación de espacio vital, la ausencia de competencia por luz ya mencionada al considerar la variable altura, permitió expresar el máximo potencial de la especie en cuanto a desarrollo diamétrico. Este resultado se explica a partir del

espaciamiento de Wilson, considerando que la competencia fue mayor a mayores densidades de plantación. El factor de espaciamiento fue creciendo de 12,52 % a 17,50 %, 24,86 % y 45,49 %, desde la mayor a la menor densidad de plantación, respectivamente.

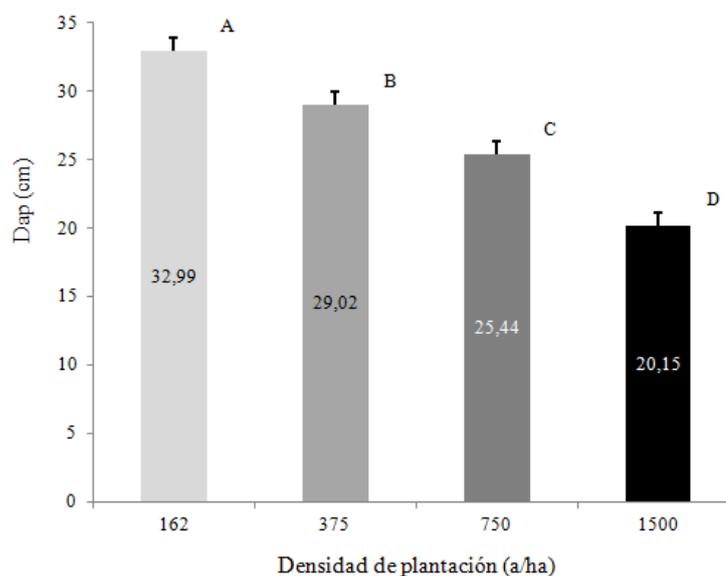


Figura 4.4. Diámetro a altura de pecho (dap) según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

El efecto negativo de la competencia en el desarrollo individual de *Grevillea robusta* es también mencionado por Lott *et al.* (2000) y Radonski y Ribaski (2010), que estudiaron la potencialidad del uso de la especie en sistemas agroforestales y silvopastoriles, respectivamente. En coincidencia con ello, Crechi (1996) analizando el efecto del espaciamiento en *Araucaria angustifolia* y Dalla Tea (1995) trabajando con *Eucalyptus grandis*, hacen referencia a que el dap fue afectado por la densidad de plantación. Según Crechi (1996), dicho efecto fue mayor en dap que en altura total.

Evaluando a través de Modelos Lineales Generalizados la evolución del dap de los individuos del rodal en un período de 18 años (Figura 4.5), se comprobó que el crecimiento a diferentes densidades de plantación tuvo diferencias estadísticamente significativas. Los coeficientes de las funciones ajustadas para el trazado de la representación gráfica del dap pueden ser visualizados en Tabla 4.2.

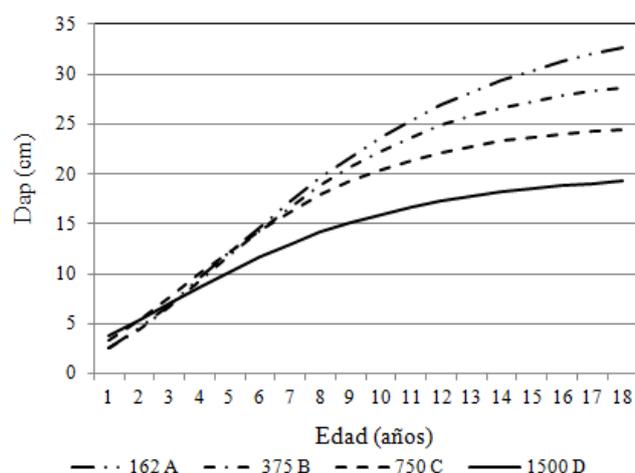


Figura 4.5. Evolución del diámetro a la altura de pecho (dap) según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Tabla 4.2. Coeficientes y estadísticos de las funciones para dap según el modelo de Chapman-Richards ($dap = \alpha * (1 + \beta * \exp(-\gamma * Edad))^{\delta}$)

parámetros	árboles por hectárea			
	162	375	750	1500
α	36,3	30,14	25,22	20,1
β	-0,61	-0,32	-0,26	-0,24
γ	0,17	0,22	0,24	0,21
δ	3,63	8,33	8,85	7,7

Distribución diamétrica

A modo de caracterizar el desempeño de *Grevillea robusta* en función a su densidad de plantación, la Figura 4.6 presenta la función de probabilidad acumulada en base al modelo de Weibull (Soarez, 2006). Se observó un desplazamiento de las curvas hacia la derecha, indicando que con la disminución de la densidad de plantación se presentó un mayor número de individuos con diámetro superiores a 30 cm.

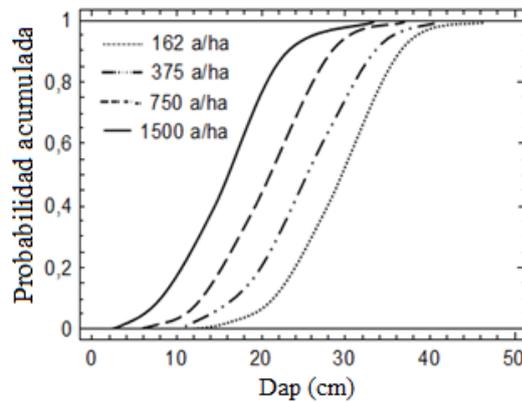


Figura 4.6. Distribución de probabilidades acumuladas de diámetro a altura de pecho (dap) según modelo Weibull para *Grevillea robusta* de 18 años de edad en función a la densidad de plantación

La distribución de frecuencias en base a los datos observados (Figura 4.7) evidencia que a 1500 a/ha el 30 % de los individuos superan los 30 cm de diámetro, con un rango diamétrico de 6 a 33 cm. A 750 a/ha dicha frecuencia asciende a 46 %, con un rango de 8 a 38 cm, a 375 a/ha dichos individuos representan un 68 % con un rango de 12 a 44 cm y a 162 a/ha los individuos de las clases superiores a 30 cm constituyen el 85 %, con un rango de distribución de 12 a 46 cm.

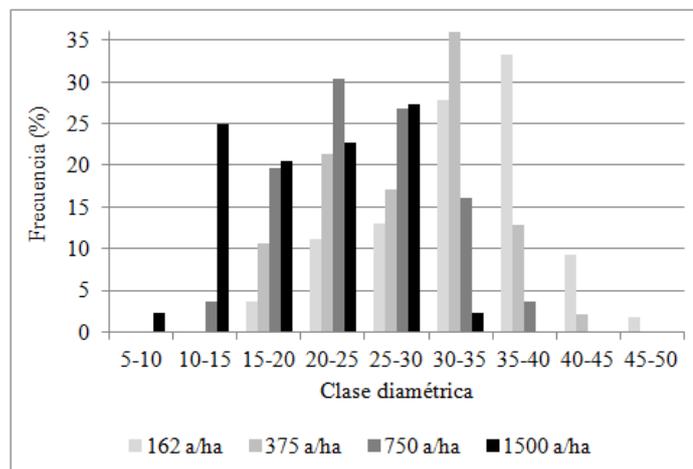


Figura 4.7. Frecuencia relativa porcentual según clase diamétrica para *Grevillea robusta* de 18 años de edad

Área basal

Al considerar área basal (G) en m^2/ha (sumatoria de áreas transversales a 1,3 m de todos los individuos de una hectárea) la incidencia del número de individuos hace, no obstante la diferencia individual en tamaño, que los tratamientos de mayores densidades de plantación presenten mayor área basal en comparación con los de densidades menores (Figura 4.8). Dicho comportamiento se mantiene en la evolución de la masa a lo largo de los años (Figura 4.9 y Tabla 4.3).

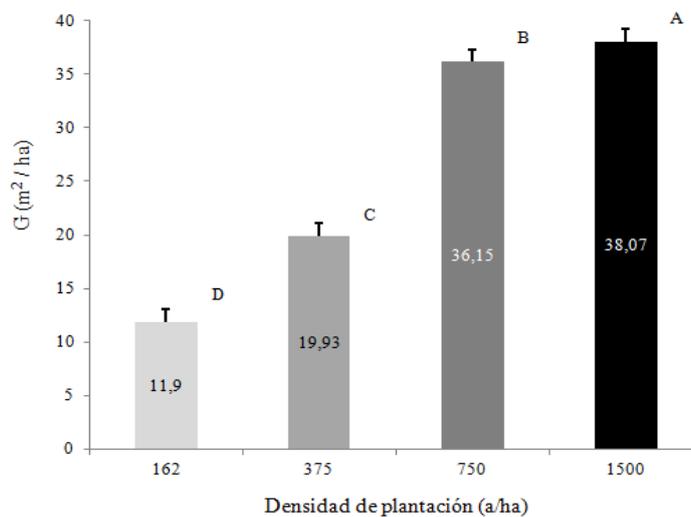


Figura 4.8. Área basal (G) según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

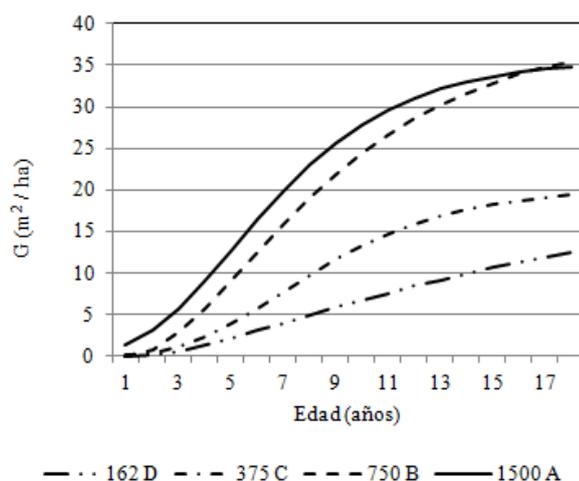


Figura 4.9. Evolución del área basal (G) según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

Tabla 4.3. Coeficientes y estadísticos de las funciones para área basal según el modelo de Chapman-Richards (área basal = $\alpha*(1+\beta*\exp(-\gamma*Edad))^{\delta}$)

parámetros	árboles por hectárea			
	162	375	750	1500
α	19,19	20,55	39,00	35,76
β	-1,13	-0,30	-1,15	-0,17
γ	0,09	0,26	0,19	0,28
δ	1,7	19,40	2,48	24,09

Volumen individual

El volumen con corteza de árboles individuales fue menor a mayores densidades de plantación (Figura 4.10). A 162 a/ha hay un 24 % más de volumen individual que a 375 a/ha, un 45 % más que a 750 a/ha y un 65 % más que a 1500 a/ha.

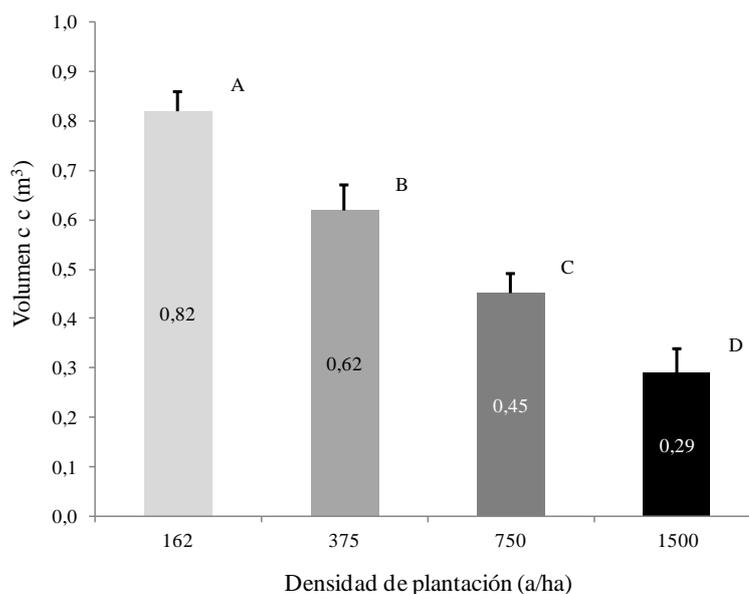


Figura 4.10. Volumen individual con corteza según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Volumen por hectárea

Al considerar la variable volumen con corteza por hectárea (V_{cc}/ha), los tratamientos de 1500 y 750 a/ha presentan diferencia estadísticamente significativa en relación a los de 375 y 162 a/ha (Figura 4.11). Esto se debe principalmente al mayor número de individuos, acompañado en menor grado por su mayor altura, a pesar de su menor v_{cc} individual. Este hecho es importante desde el punto de vista del manejo forestal, máxime al ser una especie de potencial interés para emprendimientos agroforestales en los que se requiere un menor número de individuos por unidad de superficie a fin de evitar competencia de recursos necesarios para la actividad agrícola (Barth *et. al.*, 2015). Las diferencias estadísticas entre las distintas densidades de plantación se mantienen a lo largo de todo el ciclo de crecimiento evaluado (Figura 4.12, Tabla 4.4).

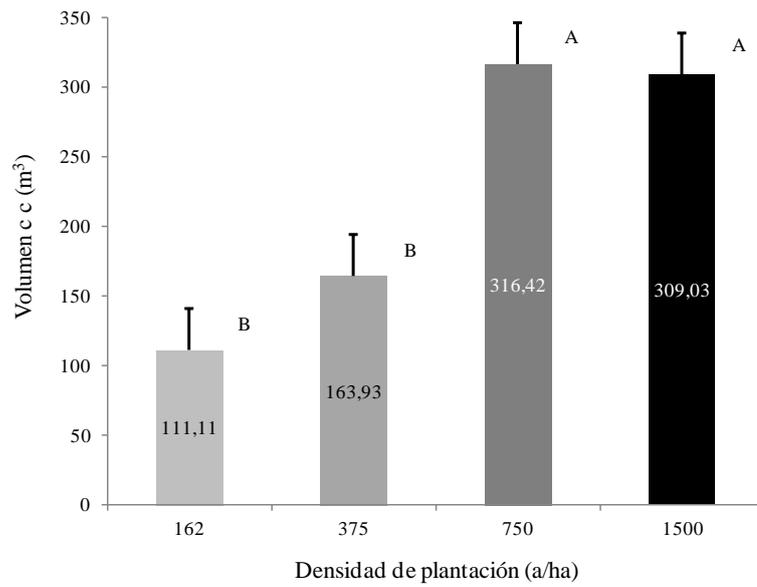


Figura 4.11. Volumen con corteza por hectárea según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

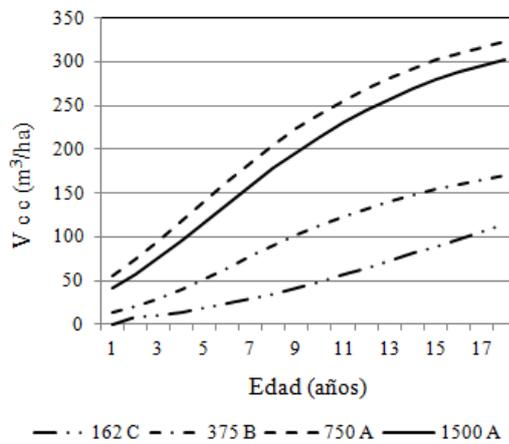


Figura 4.12. Evolución del volumen total con corteza según edad y densidad de plantación. (Líneas representadas: Modelo de Chapman-Richards). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

Tabla 4.4. Coeficientes y estadísticos de las funciones para volumen total con corteza según el modelo de Chapman-Richards (área basal = $\alpha \cdot (1 + \beta \cdot \exp(-\gamma \cdot \text{Edad}))^\delta$)

parámetros	árboles por hectárea			
	162	375	750	1500
α	306,07	195,43	357,4	345,77
β	-0,52	-0,17	-0,06	-0,16
γ	0,07	0,17	0,17	0,16
δ	6,14	17,46	35,86	14,55

En particular, el tratamiento de 750 a/ha presentó una acumulación proporcional de biomasa diferente evidenciado por su mayor índice de área foliar (Tabla 4.5). Esta situación podría indicar que es el punto de inflexión de la respuesta a los tratamientos considerados.

Tabla 4.5. Índice de área foliar según densidad de plantación en *Grevillea robusta* de 18 años de edad

Densidad de plantación arb/ha	Índice de área foliar (m ² · m ⁻²)
162	2,59 b
375	2,31 b
750	3,61 a
1500	2,35 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (P>0,05)

Funciones de producción

Si bien existen diferencias significativas en la evolución en área basal y volumen según la densidad de plantación, fue posible modelar dichas características en un modelo único, considerando en el mismo variables vinculadas a dicho comportamiento como ser: el número de árboles en el modelo de área basal presente, que posteriormente formó parte de los modelos de producción futura en área basal y producción presente y futura en volumen con corteza. Cabe acotar que, los modelos obtenidos son de aplicación en la zona y para el rango de tamaño considerados en su ajuste. Amerita a futuro ampliar la base de datos de modelación a fin de incluir un mayor número de zonas dentro de la región. Los modelos ajustados fueron:

Modelo de producción presente en área basal (m²/ha)

$$G_1 = \exp(-2,81236 - 7,80236 * 1/edad_1 + 0,815543 * \ln(N) + 0,439135 * \ln(dap))$$

Siendo $R^2 = 97,97\%$ y $S_{xy} = 0,15$. Dónde, G_1 es el área basal presente y N hace referencia al número de individuos por hectárea.

Modelo de producción futura en área basal (m²/ha)

$$G_2 = \exp(-0,458853 + 1,15089 * (edad_1 / edad_2) * \ln(G_1) + 6,3917 * (1 - (edad_1 / edad_2)) - 0,152583 * altura * (1 - (edad_1 / edad_2)))$$

Siendo $R^2 = 98,25\%$ y $S_{xy} = 0,11$. Dónde, G_2 es el área basal futura, $edad_1$ es la edad actual y $edad_2$ se refiere a la edad futura a la que le interesa predecir el área basal.

Modelo de producción presente en volumen con corteza (m³/ha)

$$V_{cc1} = \exp(1,54344 + 8,10178 * (1/edad_1) + 1,2123 * \ln(G_1) - 0,649005 * (altura / edad_1))$$

Siendo $R^2 = 96,41\%$ y $S_{xy} = 0,15$. Dónde, V_{cc1} es el volumen presente con corteza.

Modelo de producción futura en volumen con corteza (m³/ha)

$$V_{cc2} = \exp(0,788754 + 8,43366 * 1/edad_2 + 1,1771 * (edad_1 / edad_2) * \ln(G_2))$$

$$*\ln(G_1) + 0,370728*(1-(\text{edad}_1/\text{edad}_2))*\text{altura})$$

Siendo $R^2 = 95,54\%$ y $S_{xy} = 0,18$. Dónde, V_{cc2} es el volumen futuro con corteza.

Calculado el error de ajuste de los modelos (contrastando contra sus propios datos) se considera que su comportamiento es aceptable, ya que las pendientes de las rectas ajustadas entre valores observados y predichos son cercanas a 1 (Figura 4.13).

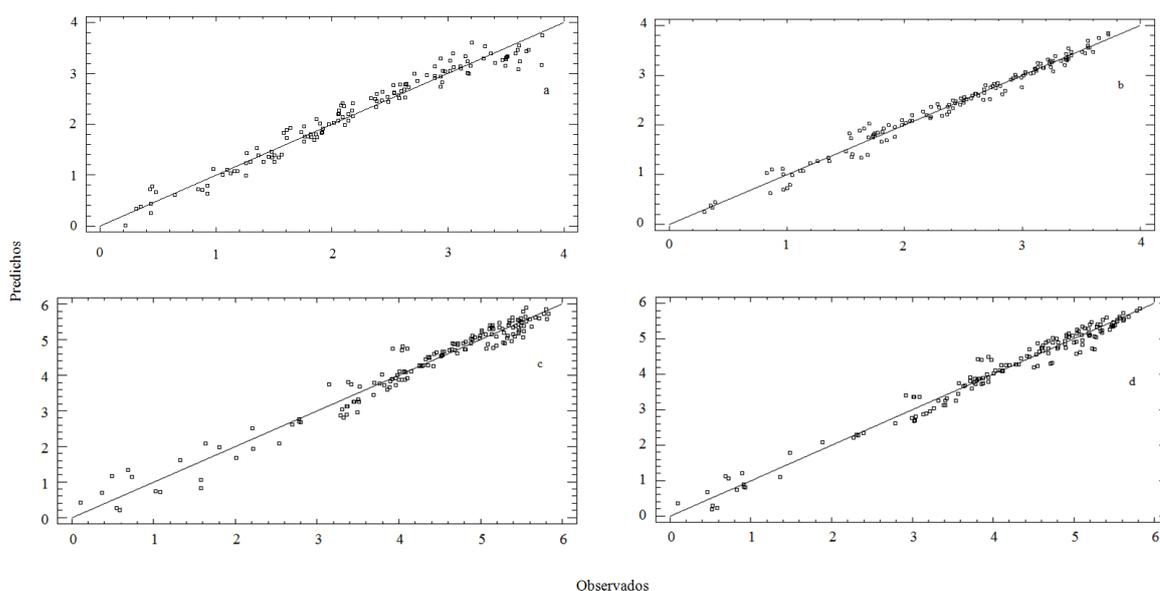


Figura 4.13. Valores observados versus predichos, modelos de producción de *Grevillea robusta*. a: área basal presente, b: área basal futura, c: volumen presente, d: volumen futuro

Validados los modelos ajustados contra la muestra independiente, área basal presente (G_1) presentó un error promedio de 7 %; área basal futura (G_2), 14 %; volumen presente (V_{cc1}), 14 % y volumen futuro (V_{cc2}), 5 %.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La altura dominante no está influenciada por la densidad de plantación, con la excepción de la densidad de 162 a/ha, en la que nunca se presentó competencia por luz entre árboles de la misma especie, recurso de suma importancia al ser *Grevillea robusta* una especie considerada heliófita.

Las variables dap, altura media, volumen individual y área basal y volumen por hectárea son influenciadas por la densidad inicial de plantación.

Menores densidades de plantación presentan mayor dap y menor altura media, así como mayor volumen individual.

Mayores densidades de plantación presentan mayor área basal y volumen por hectárea.

Cuanto mayor sea el diámetro objetivo de la producción menor deberá ser la densidad inicial de plantación, o en su defecto, se hará indispensable la realización de raleos intermedios.

Si se prioriza la maximización del volumen, esto se logrará a altas densidades de plantación, debiendo analizarse los riesgos de esta decisión en vistas al uso dado a la especie, madera para aserrado y ebanistería que priorizan calidad y mayores dimensiones. A densidades menores, más del 50 % de los individuos superaron los 30 cm de dap a los 18 años de edad.

La función de Chapman- Richards describe adecuadamente la evolución de las variables dap, altura media, área basal y volumen a través de los 18 años considerados.

Los modelos empleados para estimación de producción en área basal y volumen presente y futuro por hectárea tienen buen desempeño, con valores de coeficiente de determinación superiores a 95 % en todos los casos, lo que fue corroborado por la validación contra la muestra independiente.

No obstante lo expresado en el párrafo precedente, no se recomienda el uso de los modelos de producción presentados en edades inferiores a 5 años y fuera de las dimensiones consideradas en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Akyeampong E., Hitimana L., Torquebiau E. and Munyemana P. C. 2000. Multistrata Agroforestry with Beans, Bananas and *Grevillea robusta* in the Highlands of Burundi. *Experimental Agriculture* 35:357-369.

Assmann E. 1970. *The Principles of Forest Yield Study*. Pergamon Press. Oxford. New York. 506 pp.

- Baggio A. J., Caramori P. H., Androcioli filho A. y Montoya L. 1997. Productivity of southern Brazilian *Coffee* plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. *Agroforestry Systems* 37:111-120.
- Bailey R. 1986. Rotation age and establishment density for planted slash and loblolly pines. *Southern Journal of Applied Forestry*, 10:162–168.
- Barth S. R., Giménez A. M., Joseau M. J., Gauchat M. E. y Fassola H. E. 2015. Efecto de la densidad de plantación de *Grevillea robusta* A. Cunn. sobre la calidad de la madera en vistas a un uso agroforestal de la especie. Libro de Actas. VIII Congreso Internacional sobre Sistemas Agroforestales para la Producción Pecuaria y Forestal Sostenible. III Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles. Iguazú. Argentina. Pp. 243 – 248.
- Bernardo A., Reis M. L., Reis G. F., Harrison R. G. and Firme D. J. 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita*, *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*. 104: 1 – 13.
- Coetzee J. 1991. The influence of stand density on the yield of *Eucalyptus grandis*: a comparison between a good site and a poor site at age 4 years. IUFRO Symposium. Intensive Forestry. The role of Eucalypts. Durban, South Africa. 2:901-916.
- Crechi E. 1996. Efeitos da densidade da plantação sobre a produção, crescimento e sobrevivencia de *Araucaria angustifolia* (Bert.) o. Ktze. em Misiones, Argentina. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do Título de "Mestre em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Brasil. 195 pp.
- Crechi E., Fernández R., Fassola H., Reboratti H. 2003. Efectos de la densidad de plantación sobre el crecimiento y la producción en *Eucalyptus grandis* a la edad de 6 años. En: 10° Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF-INTA. Eldorado, Misiones. 12 pp.
- Crechi E., Keller A., Fassola H., Fernández R. y Moscovich F. 2008. Efectos de la intensidad de raleo sobre la producción en volumen de *Grevillea robusta* A. en el sur de Misiones, Argentina. En: 13° Jornadas Técnicas, Forestales y Ambientales, Eldorado, Misiones, Facultad de Ciencias Forestales-UNaM; EEA Montecarlo-INTA. 11 pp.
- Dalla Tea F. 1995. Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en entre Ríos, Argentina. *Revista Investigaciones Agropecuarias. Sist. Recursos Forestales*. 4(1):57-71.
- Daniel P. W., Helms V. E. y Baker F. S. 1982. *Principios de Silvicultura*. México: McGraw Hill. 492 pp.
- Dirección General de Recursos Forestales de Corrientes. 2013. Inventario forestal. Publicado en internet. Disponible en: <http://recursosforestales.corrientes.gob.ar/>. Activo en Diciembre 2013.

- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Esquivel J., Lacorte S., Goldfarb C., Fassola H., Colcombet L. y Pachas N. 2010. Sistemas silvopastoriles con especies maderables en la República Argentina. Actas VI Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la producción Pecuaria Sostenible. Panamá. Pp. 68.
- Fassola H., Moscovich F., Domecq C., Ferrere P., Lacorte S., Hampel H., Maletti C. y Alegranza D. 2004. Regulación de la densidad en rodales de *Grevillea robusta* A. Cunn. para la producción de madera de calidad y forraje en el sur de la provincia de Misiones. INTA. Ediciones RIA 33 (1):15-38.
- Ferreira C. A. y Martins E. G. 1998. O potencial da grevílea (*Grevillea robusta* A. Cunn.) para reflorestamento. In: GALVÃO, A. P. M. (Org.). Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais. Embrapa Florestas. Curitiba. Brasil. Pp. 169-178.
- Guerra Bugueño E., Célis Mosqueira F. y Moreno García N. 2013. Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de *Eucalyptus globulus*. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 20(1):22- 31.
- Huang S., Yang. Y. and Wang Y. 2003. A Critical Look at Procedures for Validating Growth and Yield Models. En: Amaro A., Reed D., Soares P. (Eds.) Modelling Forest Systems. CABI-Publishings, Wallingford. Pp 271-293.
- INFOR (Instituto Forestal). 1995. Primeros resultados en un ensayo de espaciamiento, poda y raleo con *Eucalyptus globulus* en Constitución (VII Región). Santiago, Chile: División Ordenación Forestal e Inventarios. 22 Pp.
- Jobet, J. 1999. Efecto del espaciamiento inicial sobre el crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus nitens* plantado en suelos de trumao. Silvotecnica, 12:80–104.
- Lott J. E., Howard S. B., Ong C. K. and Black C. R. 2000 a. Long-term productivity of a *Grevillea robusta*-based overstorey agroforestry system in semi-arid Kenya: P. I y II. Tree growth. Forest Ecology and Management 139:187 – 201.
- Madrigal A., Álvarez González J.G., Rodríguez Soalleiro R. y Rojo A. 1999. Tablas de producción para los montes españoles. Fundación Conde del Valle de Salazar. 253 pp.
- Martínez R., Azpiroz H.; Rodríguez J., Cetina V. and Gutiérrez M. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. Ra Ximhai, 2:815–846. Publicado en Internet. Disponible en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/6903>. Activo en Diciembre 2015.
- Montagu K., Kearney D. and Smith G. 2003. Pruning eucalypts: The biology and silviculture of clear wood production in planted eucalypts. Australia: Rural Industries Research and Development Corporation. 36 pp.

- Mushove P. 1991. Comparison of three Eucalypt species in Nelder wheel spacing trials on four Zimbabwean sites. IUFRO Symposium. Intensive Forestry. The role of Eucalypts. Durban, South Africa. 2:940-951.
- Neilsen W. A. and Gerrand A. M. 1999. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacings and the effect on final crop selection. *Forest Ecology and management* 123:217-229.
- Patrone G. 1963. Lezioni di dendrometria. Universita de Firenze. Italia. Pp. 339.
- Pezzutti R. V. 2011. Efeitos biológicos e econômicos de tratamentos silviculturais em plantios de *Pinus taeda* L. no nordeste argentino. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa María. Brasil. 179 pp.
- Pinilla Suárez J. y Ulloa I. 2001. Nuevos resultados en un ensayo de espaciamento y raleo con *Eucalyptus globulus* en Constitución (VII Región). IUFRO Conference. The Eucalypts of the future. Valdivia. Chile. 9 pp.
- Radonski M. I. e Ribaski J. 2010. Excentricidade da medula em *Grevillea robusta* e *Corymbia citriodora* cultivados em sistema silvipastoril. Comunicado técnico 248. Embrapa Florestas. Colombo. Brasil. 6 pp.
- Reismann, C. B. 1983. Clasificación de sitio para *Araucaria angustifolia*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* no segundo planalto de Estado de Paraná. Projeto: Fundação da UFPR para o desenvolvimento da Ciencia, da tecnologia e da Cultura. Curitiba. Brasil.
- Roose E. and Ndayizigiye F. 1997. Agroforestry, water and soil fertility management to fight erosion in tropical mountains of Rwanda. *Soil Tech.* 11:109-119.
- Schönau A and Coetzee J. 1989. Initial spacing, stand density and thinning in Eucalypt plantations. *For Ecol Manage* 29:245–266.
- Schumacher F. X. 1930. Yield Stands for Douglassfire in California. Agric. Exp. Station. Buletin 491. 41 pp.
- Sharma M., Burkhart H. E. and Amateis R. L. 2002. Modeling the effect of density on the growth of Loblolly pine trees. *South African Forestry Journal* 26(3):124-133.
- SIFIP. Sistema de información Foresto Industrial de la Provincia de Misiones. Publicado en internet Disponible en: <http://extension.facfor.unam.edu.ar/sifip/index.html>. Activo en marzo 2013.
- Soares T. S. 2006. Avaliação de modelos de distribuição em povoamentos de Eucalipto não devastados. Tese Doutoral. Universidade federal de Viçosa. Brasil. 75 pp.
- Sullivan A. D. and Clutter J. L. 1972. A simultaneous growth and yeld model for loblolly pine. *Forest Science* 18 (1):76-86.
- Wilson F. G. 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. *Journal of Forestry* 77(8):483-486.

PROPIEDADES ANATÓMICAS Y FÍSICO-MECÁNICAS DE LA MADERA

INTRODUCCIÓN

El objetivo de la producción determina el manejo silvícola a implementar. Diferentes densidades de plantación generan variaciones en las dimensiones de las trozas dado que el espaciamiento influye en el crecimiento (Fassola *et al.* 2004), especialmente en el diámetro del árbol.

Numerosos estudios hacen referencia a cambios en condiciones de microclima (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y condiciones del suelo) relacionadas a variaciones espaciales y temporales dependientes de la densidad de plantación de las especies forestales (Barradas y Fanjul, 1986; Baggio *et al.*, 1997; Pezzopane *et al.*, 2003, 2007; 2011). Estas diferencias ocasionan un desarrollo desigual, no solo a nivel de crecimiento y producción de leño vinculados a patrones diferenciales de acumulación de biomasa (Barth, 2016), sino también en la duraminización y en las propiedades físico-mecánicas de la madera.

Wilkins (1991), trabajando con *Eucalyptus grandis*, encontró que los tratamientos silvícolas que favorecen un aumento en la tasa de crecimiento dan lugar a un mayor porcentaje de duramen. Cada año el tejido del cambium genera un nuevo conjunto de células que forma un anillo de crecimiento. Los nuevos anillos constituidos de células jóvenes forman la madera de la albura. Con el transcurso de los años estos anillos permanecerán en el interior del tronco como consecuencia de la formación de nuevos anillos anuales en la periferia. Las células que constituyen estos anillos sufren un proceso físico-químico mediante el cual la madera de albura se transforma en duramen (Esau, 1985).

Generalmente se asume que al aumentar la densidad básica de la madera mejoran sus propiedades de resistencia (Carmona *et al.*, 2000). Sin embargo, el efecto del espaciamiento

inicial y de los raleos sobre la densidad de la madera es muy discutido. Hay autores que afirman que un incremento en la tasa de crecimiento diamétrico no tiene efecto sobre la densidad básica de la madera (Parker *et al.*, 1976; Davel *et al.*, 2005), mientras que otros investigadores alegan que mayores espaciamientos generan madera de menor densidad (Pryor, 1967; Erickson y Harrison, 1974; De Lima *et al.*, 2009).

De Lima *et al.* (2009) consideran que al momento de decidir la densidad inicial de una plantación es necesario pensar en la influencia del espaciamiento en la calidad de los productos que se obtendrán, sobre todo si la materia prima con destino a la industrialización proviene de plantaciones de rápido crecimiento.

El término “calidad de madera” hace referencia al conjunto de características de apariencia, propiedades físico-mecánicas y químicas exigidas para los distintos usos. Entre las propiedades físicas de la madera, la densidad básica es una de las características más utilizadas dada su alta correlación con las propiedades mecánicas de la madera (Muñiz Bolzon, 1993; Velásquez *et al.*, 2009). Esta propiedad también está relacionada con las características anatómicas de la madera (Winck, 2013). A través de un análisis de su estructura anatómica es posible inferir sobre sus propiedades físico-mecánicas, siendo esto complejo dado a la variabilidad debida a factores genéticos y ambientales que aumentan la heterogeneidad de la madera (Minghui y Li, 2001; Plomion *et al.*, 2001; Denardi, 2007; Sette, 2007).

La caracterización de las propiedades de la madera proporciona información sobre su trabajabilidad en la industria, permitiendo también definir sus potenciales mercados. Entre otras propiedades de interés, se pueden mencionar la contracción y el hinchamiento, más aun al considerar a *Grevillea robusta* como una especie de interés potencial para la industria del mueble. Las particularidades halladas en cuanto a propiedades físico-mecánicas y crecimiento, aun a bajas densidades de plantación, hacen que *G. robusta* sea una especie de interés para su cultivo en sistemas agroforestales o silvopastoriles.

En Misiones, la actividad agrícola fue tradicionalmente desarrollada a cielo abierto, pero con el transcurso del tiempo las características de clima, topografía y suelo evidenciaron consecuencias relacionadas al agotamiento de nutrientes del suelo y erosión hídrica (Cabrera, 1976; Ligier *et al.*, 1990; Piccolo *et al.*, 2012; Toledo *et al.*, 2014). La incorporación de una cubierta de árboles a la actividad agrícola proporciona beneficios

ambientales protegiendo el suelo y promoviendo un mayor reciclaje de nutrientes. El cultivo de *G. robusta* asociado a actividades agrícolas tradicionales como ganadería, yerba mate, té y otras, brinda al productor la posibilidad de incrementar sus ingresos con madera de calidad de propiedades físico-mecánicas similares a las obtenidas en plantaciones forestales puras manejadas con mayores densidades de plantación.

El objetivo de esta etapa de trabajo fue estudiar el efecto de la densidad de plantación sobre la calidad de la madera en términos de proporción de duramen, anatomía del leño y de sus propiedades físico-mecánicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con probetas tomadas de trozas de los individuos apeados del ensayo de densidad de plantación descrito previamente en el capítulo 2 referido a biomasa aérea.

Las trozas y discos de todos los árboles fueron identificados mediante plaquetas metálicas con datos de tratamiento, número de árbol, altura desde la base y fecha de recolección.

Para la determinación de la relación albura-duramen y densidad básica de la madera se trabajó con discos provenientes de diferentes alturas de cada uno de los árboles apeados. Los discos fueron lijados, luego se obtuvieron imágenes digitalizadas a fin de visualizar los límites de albura y duramen a través de diferencias en la coloración (Moglia *et al.*, 2011). La medición de área de albura y duramen se realizó a través del software procesador de imágenes UTHSCSA “Image Tool” para Windows versión 3.0 (Wilcox *et al.*, 2002), previamente calibrado. Para la evaluación de posibles diferencias entre los distintos tratamientos, la relación albura-duramen se expresó en forma porcentual.

En la caracterización anatómica se midió longitud y diámetro de fibras y de vasos a través del equipo Fiber Quality Analyzer FQA-360. Esta medición requirió la disgregación previa del leño. El disgregado se realizó con la técnica de dióxido de cloro-ácido acético-carbonato (Nuñez, 2005). Las astillas del leño de 2,5 a 3 mm de espesor y 2,5 cm de longitud fueron saturadas en agua (24 horas) y llevadas a una solución de clorito de sodio al 5 % de cloro activo, se mezcló y se agregó ácido acético glacial, 1 ml cada 200 ml de solución de clorito. En unos instantes la solución tomó color amarillo y finalmente anaranjada, se cargó esta solución a los tubos de ensayos que contenían los prismas del

leño. Posteriormente se dejó reaccionar dicha preparación a temperatura ambiente (aproximadamente 24 °C) por siete días. Luego se extrajeron y se hirvieron en una solución de carbonato de sodio al 10 % por treinta minutos. Se lavó el residuo con agua hasta que la misma tomó un pH neutro, aproximadamente 5 lavados. Finalmente, el material obtenido se agitó en agua hasta que el prisma se deshizo en forma completa conformando una suspensión de fibras y vasos en agua destilada. Se llevó esta suspensión al equipo de medición que en forma automática brindó los datos de longitud y diámetro de fibras y vasos, entre otros. Las muestras de astillas se tomaron de una rodela cercana a la base de la primera troza aserrable, considerando probetas de posición interior y exterior en los 4 puntos cardinales (Figura 5.1).



Figura 5.1. Localización probetas de posición interna (I), color ocre; probetas de posición externa (E), color marrón

Para el cálculo de la densidad de madera se emplearon probetas cúbicas de 2 cm de lado (Figura 5.2) obtenidas de listones de un largo equivalente al diámetro de los discos obtenidos (IRAM 9544, 1973). La densidad básica (db) se obtuvo como:

$$db = Pa / Vh \quad 5.1.$$

Donde, Pa es el peso anhidro y Vh es el volumen de la probeta al contenido de humedad máximo.

El volumen de las probetas se calculó a través del principio de Arquímedes, considerado uno de los más prácticos y precisos. El peso anhidro de probetas se obtuvo por pesaje tras secado a estufa hasta peso constante a una temperatura de 103 ± 2 °C.

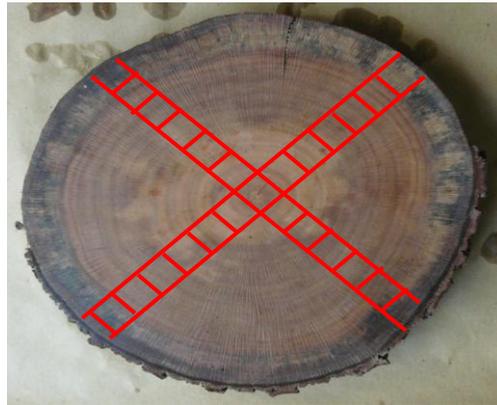


Figura 5.2. Ubicación probetas para medición de densidad básica de la madera

Se evaluó la contracción y el hinchamiento en trozas de 0,70 m obtenidas inmediatamente por encima de la primer troza aserrable. Para esta determinación se obtuvieron probetas de 2 cm de sección por 5 cm de longitud según norma IRAM 9543 (1966). Las probetas fueron cortadas de forma que permitieran evaluar contracción e hinchamiento en los sentidos radial, tangencial y longitudinal o axial (Figura 5.3). Las mediciones se realizaron con calibre digital (precisión 0,01 mm). Se determinaron la contracción y el hinchamiento total del estado saturado al anhidro.



Figura 5.3 Saturación de probetas para evaluación de hinchamiento

La contracción total se calculó como:

$$CT = ((L_s - L_o) / L_s) \cdot 100 \quad 5.2.$$

Donde, CT es la contracción total expresada en porcentaje, L_s es la longitud saturada (mm) y L_o es la longitud anhidra (mm).

El hinchamiento se calculó como:

$$H = ((L_s - L_o) / L_o) \cdot 100 \quad 5.3.$$

Donde, H es el hinchamiento máximo, expresado en porcentaje, L_s es la longitud saturada (mm) y L_o es la longitud anhidra (mm).

La contracción volumétrica total y el hinchamiento volumétrico total se obtuvieron haciendo la sumatoria en sentido radial, tangencial y longitudinal de la contracción total y el hinchamiento total, respectivamente.

Se calculó el coeficiente de anisotropía (CA), entendiéndose con ello a la relación entre los movimientos lineales tangencial y radial. Para ello se trabajó con la expresión:

$$\text{Anisotropía de la contracción} = \text{contracción tangencial} / \text{contracción radial} \quad 5.4$$

Para la medición de dureza Janka (resistencia a la penetración de un cuerpo más duro), se emplearon probetas cúbicas de 5 cm por lado. Estas dimensiones constituyen una adaptación de la norma ASTM D 143/52, las caras opuestas tienen dos superficies tangenciales, dos radiales y dos transversales (Figura 5.4). Se realizó un ensayo en cada superficie, obteniéndose medias para cada una de ellas. El ensayo se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos que introduce una semiesfera de acero de 1,128 cm de diámetro, que deja una impronta de sección circular de un centímetro cuadrado de superficie. La dureza Janka se expresó en kg/cm². La velocidad de carga del ensayo fue de 6 mm/minuto.



Figura 5.4. Fotografía de una probeta para evaluación de dureza Janka

Respecto a propiedades mecánicas, el módulo de elasticidad fue evaluado en todas las tablas aserradas mediante métodos no destructivos. Se empleó el equipo Metriguard E 340, MOE dinámico (Figura 5.5). El resultado se validó con una muestra evaluada con máquina universal de ensayos, MOE estático (Figura 5.6). Para estos ensayos se trabajó en base a una adaptación de la norma IRAM 9663 (2013). Para la aplicación de las cargas se utilizó una máquina de ensayos con capacidad de desplazar el cabezal a velocidad constante y registrar las cargas con una precisión del 1 %. Los cuerpos de prueba fueron ubicados con una separación entre apoyos igual a $16h$, siendo h el ancho de la tabla, y cargados en un punto central entre los apoyos. Las tablas ensayadas tenían ancho variable, un espesor de una pulgada y una longitud de 2,5 metros. En las tablas ensayadas en forma destructiva se evaluó además módulo de rotura.

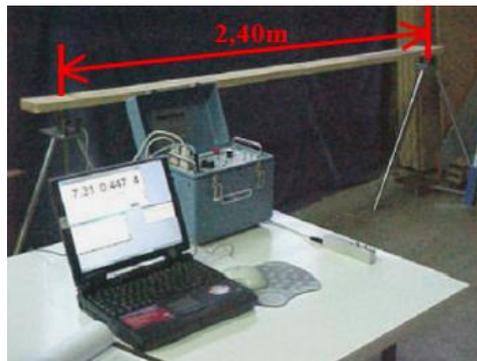


Figura 5.5. Fotografía que muestra el procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad dinámico a través de método no destructivo (Metriguard E 340)



Figura 5.6. Fotografía que muestra la determinación del módulo de elasticidad mediante el uso de una máquina universal de ensayos

Los análisis estadísticos fueron realizados con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015). Para la determinación de diferencias significativas entre tratamientos se trabajó con modelos lineales generalizados y mixtos considerando como efectos fijos al tratamiento y la posición de la probeta y como efecto aleatorio al árbol. Para la realización de las comparaciones múltiples de medias y contrastes se utilizó el procedimiento DGC (Di Rienzo, *et al.*, 2002). Todos los análisis fueron realizados con un nivel de significación del 5 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proporción de duramen según densidad de plantación

Se observó que en las menores densidades plantación, desde 162 a 750 a/ha, las proporciones de duramen fueron mayores, presentando la más alta densidad de plantación un duramen (%) significativamente menor (Figura 5.7).

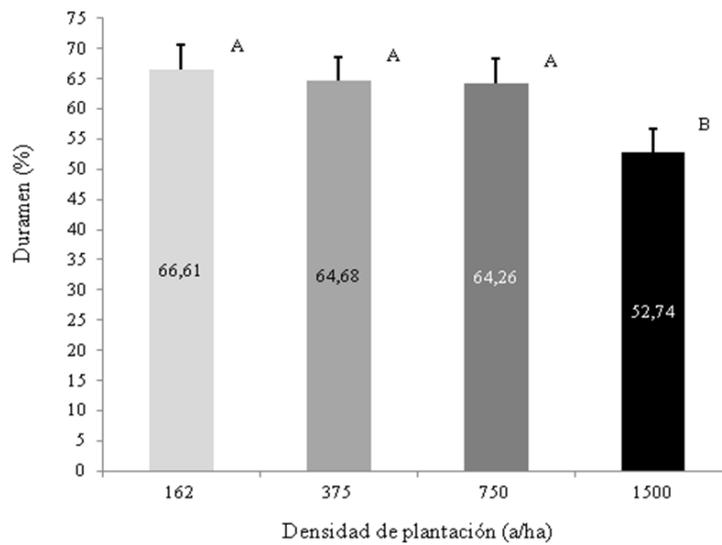


Figura 5.7. Proporción de duramen según densidad inicial de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

La proporción de albura y duramen suele estar influenciada por el espaciamiento entre árboles u otras prácticas silviculturales. En *E. grandis*, Wilkins (1991) encontró que en los tratamientos silvícolas que favorecen el aumento de la tasa de crecimiento, esto se ve reflejado en un mayor porcentaje de duramen. Lo que fue comprobado en un ensayo de *E. grandis* realizado en Misiones, Argentina (Barth y Winck, 2011).

La mayor proporción de duramen en las menores densidades de plantación, en coincidencia con los mayores crecimientos diamétricos, podría explicarse desde un punto de vista fisiológico, son necesarios adecuados volúmenes de albura, como materiales de reserva para el metabolismo y el crecimiento (Taylor *et al.* 2002). El desarrollo del duramen está relacionado positivamente con el crecimiento en diámetro ya que de esta manera el árbol mantiene un ancho de albura casi constante en sentido radial, lo que es necesario para permitir el flujo de agua requerido para la vida del individuo.

Caracterización del leño según densidad de plantación y posición radial. Fibras y vasos

Los valores medios encontrados para la longitud de fibra mostraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$), el tratamiento con mayor densidad de plantación

presentó fibras más largas respecto los demás tratamientos (6 %) (Figura 5.8). Se observó además que la longitud de fibra fue en la posición externa, más cercana al cambium (4 %) respecto a la posición interna (Figura 5.9). Trevisan *et al.* (2013) al estudiar *Eucalyptus grandis* hacen referencia a un idéntico patrón de longitud de fibras según el efecto del espaciamiento, en su caso causado por raleos. Para *Grevillea robusta*, Bussoni *et al.* (2012) citan una longitud media de fibra de alrededor de 1,5 mm mientras que, para la misma especie, Hardwood (1989) brindó una información más detallada mencionando una longitud mínima de fibra de 1,0 mm, con un valor medio de 1,62 mm y un máximo de 2,2 mm.

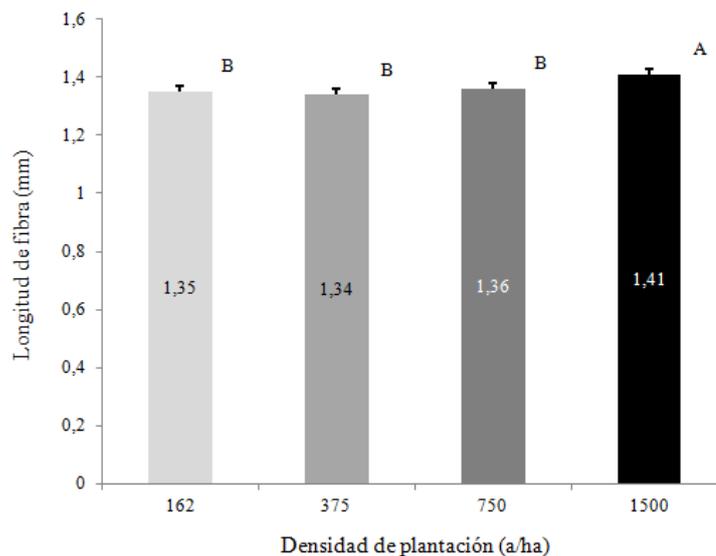


Figura 5.8. Longitud de fibra según densidad inicial de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

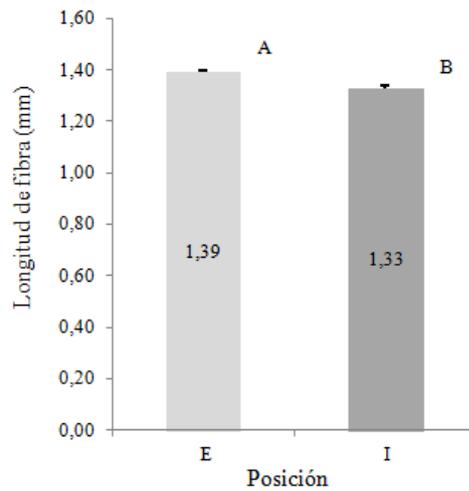


Figura 5.9. Longitud de fibra según posición respecto a la médula. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$). (E: externa; I: interna)

La densidad de plantación dio lugar a diferencias significativas en el diámetro de las fibras pero no demarcó una tendencia clara (Figura 5.10). A menor densidad de plantación se produjo el mayor diámetro de fibras, diferenciándose en forma significativa de las densidades intermedias de 375 y 750 a/ha. A 1500 a/ha se presentó una situación particular, con un mayor diámetro de fibras que en las densidades intermedias, en concordancia con la mayor longitud de fibra anteriormente enunciada para dicho espaciamiento.

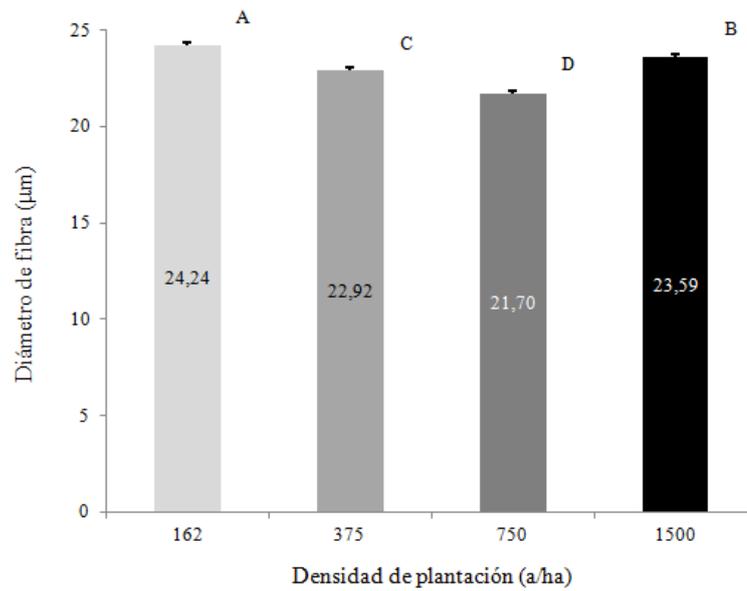


Figura 5.10. Diámetro de fibra según densidad inicial de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

Por su parte, el diámetro medio de fibras fue superior en la sección radial más alejada a la médula (Figura 5.11).

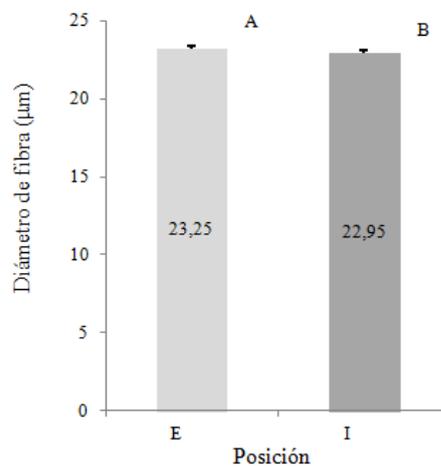


Figura 5.11. Diámetro de fibra según posición radial desde la médula. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$). (E: externo; I: interno)

El diámetro de fibras resultó inferior ($P < 0,05$) al referenciado por Hardwood (1989) quien halló, para *Grevillea robusta*, un valor de 26 micras de diámetro medio, coincidiendo éste último con el valor citado por Bussoni *et al.* (2012).

La longitud de los vasos (Figura 5.12), no presentó diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los tratamientos de 162, 375 y 1500 a/ha, pero sí entre éstos y 750 a/ha, densidad en la que se produce una acumulación diferencial de biomasa (Barth *et al.*, 2016).

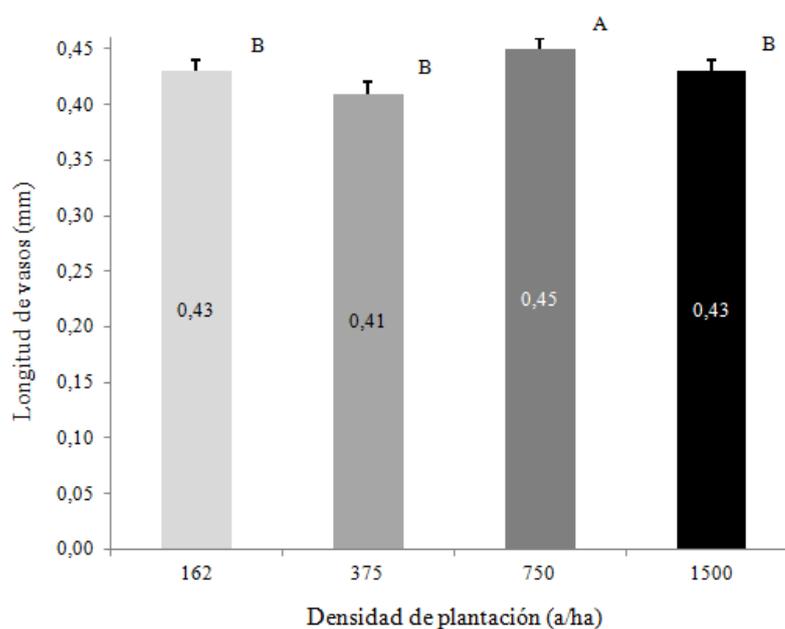


Figura 5.12. Longitud de vasos según densidad de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

La longitud de vasos fue mayor ($P < 0,05$) en la sección radial exterior, más cercana a la médula (Figura 5.13).

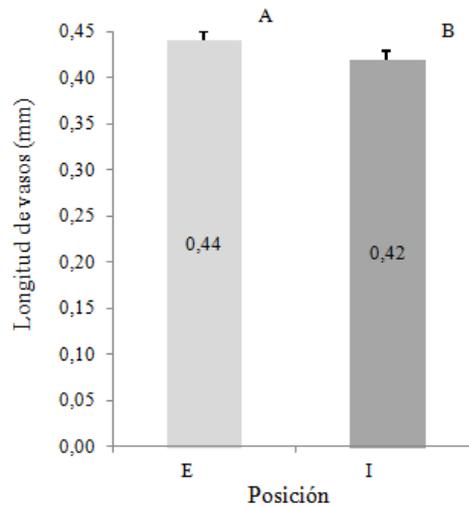


Figura 5.13. Longitud de vasos según posición en sentido radial. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$). (E: externa; I: interna)

En cuanto a diámetro de vasos (Figura 5.14), las menores densidades de plantación (162 y 375 a/ha) tuvieron mayor diámetro de vasos ($P < 0,05$) en comparación con las mayores densidades (750 y 1500 a/ha). A su vez, analizando el diámetro de vasos en función a la posición radial (Figura 5.15), la sección externa presentó los mayores valores ($P < 0,05$).

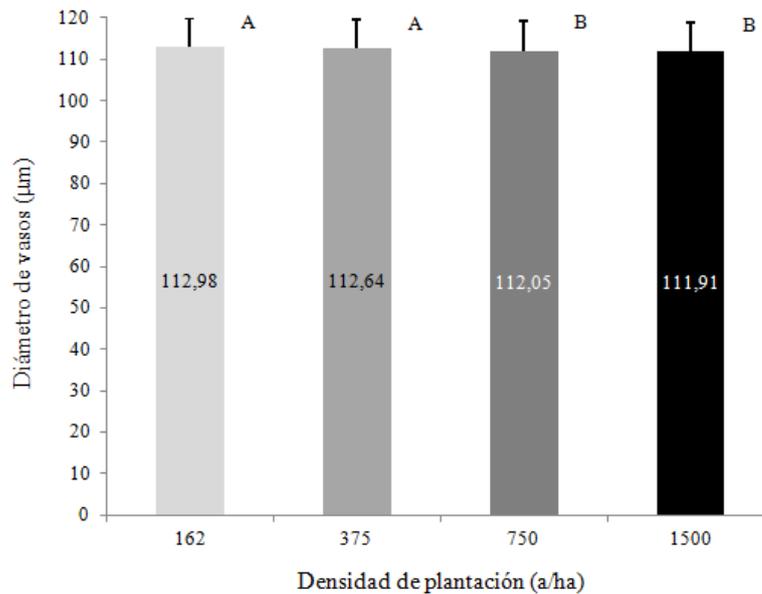


Figura 5.14. Diámetro de vasos en función a la densidad inicial de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

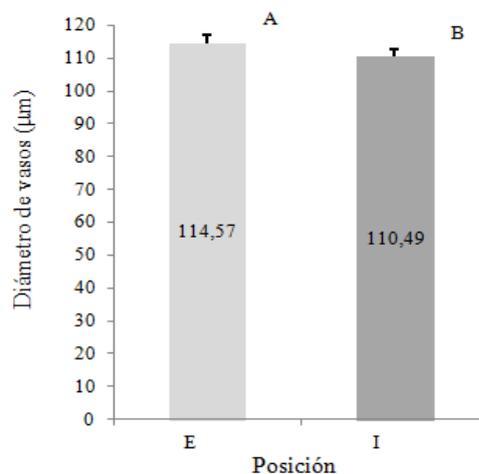


Figura 5.15. Diámetro de vasos en función a la posición en sentido radial. E: externa, I: interna). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

El comportamiento diferente en longitud de fibra en el sentido radial pudo deberse a una mayor presencia de madera juvenil próxima a la médula, la cual presenta en latifoliadas otras características como ser fibras más cortas, con menor diámetro y paredes más delgadas, lo que influye directamente en la calidad de la madera. Esta variación fue explicada por Plomion *et al.* (2001), quienes afirmaron que las dimensiones de los elementos anatómicos del leño se dan en función al envejecimiento de las células del cambium vascular, resultando en modificaciones fisiológicas y moleculares. Asimismo, Tomazello Filho (1985) menciona que en el xilema primario de la zona cambial, las divisiones celulares son menos frecuentes con el aumento de la edad de los individuos, dando lugar a que los elementos vasculares tengan más tiempo para su elongación longitudinal y transversal. Forman, de esta manera, estructuras de mayores dimensiones alcanzando su estabilización a edades mayores.

El tamaño y la distribución de los vasos en las maderas duras tienen un efecto importante en la calidad de la madera (Zobel y Van Buijtenen, 1989).

En el presente estudio, tanto la longitud y diámetro de fibras como de vasos fue afectada por la densidad inicial de plantación. Los resultados no coinciden con los comentados por Malan y Hoon (1992) y Minghui y Li (2001), quienes afirmaron que la longitud de fibras y su variación en sentido radial no están influenciadas por la densidad de

plantación, en sus casos, estudiados como influencia del raleo que brinda un mayor espacio vital al individuo. Estos autores no encontraron variación entre la proporción de vasos y radios. Distintos autores señalan que las variables anatómicas, en especial, la longitud de fibras, están relacionadas al tamaño del árbol y a la parte viva del mismo, especialmente la longitud de copa verde, lo que coincide con lo determinado por Jyske (2008). Si bien no se encontraron antecedentes del efecto de la densidad inicial de plantación en los caracteres anatómicos de latifoliadas, los antecedentes encontrados sobre oportunidad e intensidad de raleos y su influencia sobre las propiedades anatómicas fueron útiles para comparar con los resultados de este estudio.

Densidad básica de la madera

Los ensayos realizados en *Grevillea robusta* dieron como resultado una densidad básica de 0,48 a 0,52 g/cm³ (Figura 5.16). Las diferencias no fueron significativas entre las densidades de 162 y de 750 árboles/ha, pero sí entre estas y 1500 árboles/ha. En 1972, Skolmen estudiando *Eucalyptus robusta* determinó que no existía una relación evidente entre la densidad de plantación y el peso específico de la madera. En *Pinus taeda*, Martiarena *et al.* (2014) hacen referencia a que diferentes espaciamientos, consecuencia de la implementación de raleos, no tuvieron influencia en la densidad básica de la madera, aunque sí influyeron en el crecimiento de los árboles.

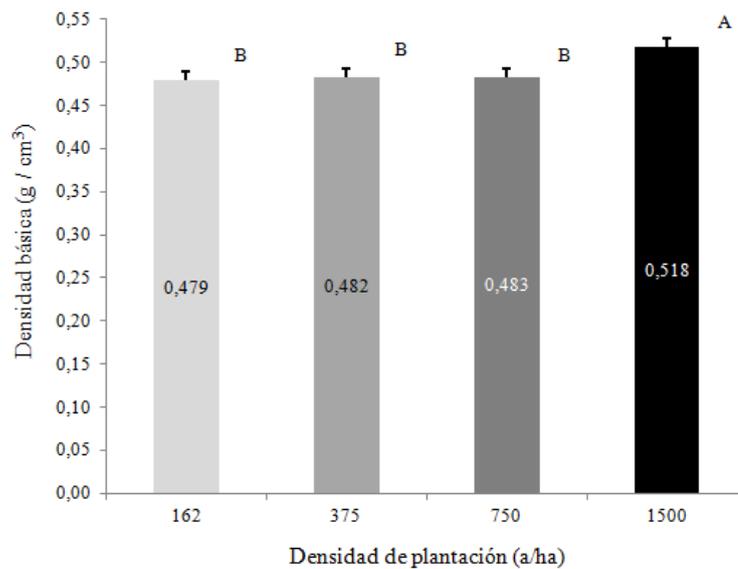


Figura 5.16. Densidad básica de la madera de *Grevillea robusta* en función a la densidad inicial de plantación (número de árboles por hectárea). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

No se evidenciaron diferencias en la densidad básica de la madera en sentido radial (desde el interior hacia la periferia de la troza), con excepción de la sección de médula ($P<0,05$) en la que también se produjeron rajaduras en tablas aserradas. La densidad básica observada pasó de una media de $0,48 \text{ g / cm}^3$ en zona de médula a $0,49 \text{ g / cm}^3$ en el resto de la sección (Figura 5.17).

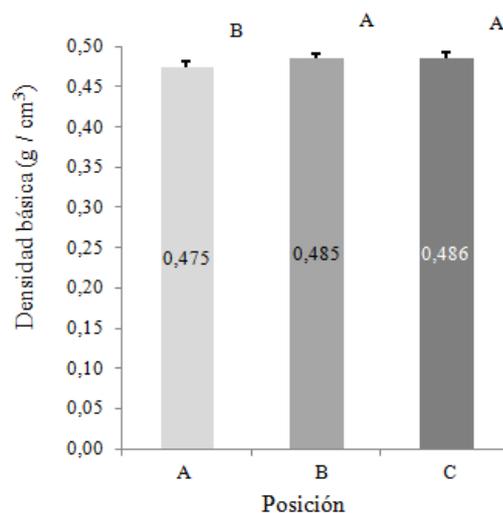


Figura 5.17. Densidad básica de la madera de *Grevillea robusta* en función a la distancia radial desde la médula expresada como posiciones A (interna), B y C (externas). Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

En contraposición a lo hallado en *Grevillea robusta*, otros estudios realizados afirman la existencia de un notorio gradiente positivo de densidad básica de médula a corteza en *Eucalyptus regnans* (Chafe, 1986), en *Eucalyptus saligna* (De Bell *et al.*, 2001) y en *Eucalyptus grandis* (Tomazello, 1985; Winck *et al.*, 2013). En *Pinus taeda* (Barth *et al.*, 2012) notaron que la densidad básica aumentó desde la médula hasta el séptimo anillo de crecimiento y a partir de ahí mostró una tendencia de valores estables hacia la periferia.

Contracción, hinchamiento y anisotropía

En cuanto a la contracción volumétrica total (sentido radial, tangencial y axial, desde el estado saturado al anhidro) no se evidenciaron diferencias entre los tratamientos de 162 a 750 a/ha, pero sí entre estos y el tratamiento de 1500 a/ha ($P < 0,05$) con valores de 11,0 a 13,4 % respectivamente (Figura 5.18). Idéntica tendencia se presentó en el hinchamiento volumétrico total.

En 1991, Tsoumis afirmó que la magnitud de la contracción de la madera es mayor a mayor densidad básica. En consonancia, en *Grevillea robusta* a una mayor densidad básica, como la encontrada en el tratamiento de 1500 a/ha, también se presentó la mayor contracción volumétrica de la madera. Resultados similares fueron determinados por Winck (2013) para *Pinus taeda* de 20 años provenientes de ensayos con distintas densidades de plantación (raleos aplicados a los 3 años de edad). Los valores de contracción de *Grevillea robusta* son superiores a los hallados para *Pinus taeda* por Winck (2013), quien menciona una contracción volumétrica total promedio de 9,95 % con un gradiente decreciente hacia las menores densidades tras la aplicación de raleos.

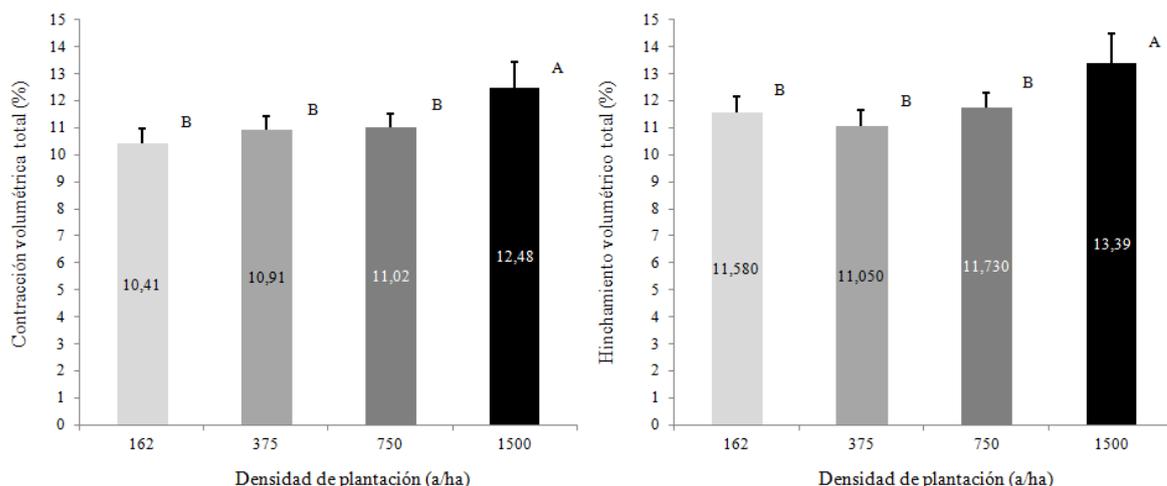


Figura 5.18. Contracción e hinchamiento volumétricos totales en madera de *Grevillea robusta* a diferentes densidades de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

El coeficiente de anisotropía fue 15 % mayor en la menor densidad de plantación, en relación a la media de los demás tratamientos (Figura 5.19), no presentándose diferencias estadísticas entre los demás tratamientos (375, 750 y 1500 a/ha). *Grevillea robusta* puede considerarse una madera de estabilidad media, tendiendo a una mayor inestabilidad en el caso del tratamiento de 162 a/ha.

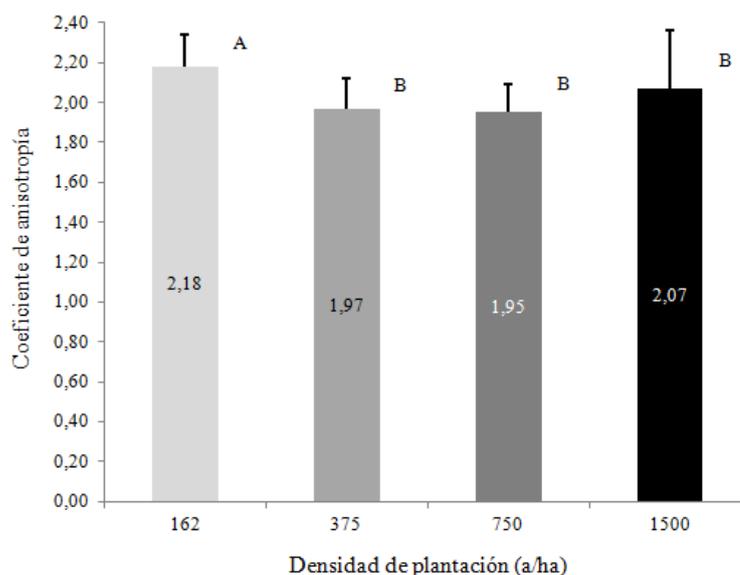


Figura 5.19. Coeficiente de anisotropía según densidad inicial de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

El coeficiente de anisotropía fue un 20 % mayor en probetas de la sección interna que en la externa ($P < 0,05$).

Dureza Janka

En las tres direcciones (radial, tangencial y longitudinal), los dos tratamientos de mayor densidad de plantación presentaron mayor dureza Janka (9 %).

En sentido longitudinal, los dos tratamientos de mayor densidad de plantación tuvieron para dureza Janka un valor promedio de 478 kg/cm^2 , mientras que los de menor densidad de plantación presentaron un valor promedio de 438 kg/cm^2 . En sentido radial los valores promedio de dureza Janka para las mayores y menores densidades de plantación fueron de 383 kg/cm^2 y 351 kg/cm^2 , respectivamente. En sentido tangencial el valor promedio de dureza Janka en las mayores densidades de plantación fue de 426 kg/cm^2 y en las menores densidades de plantación dicho promedio fue de 391 kg/cm^2 . (Figura 5.20).

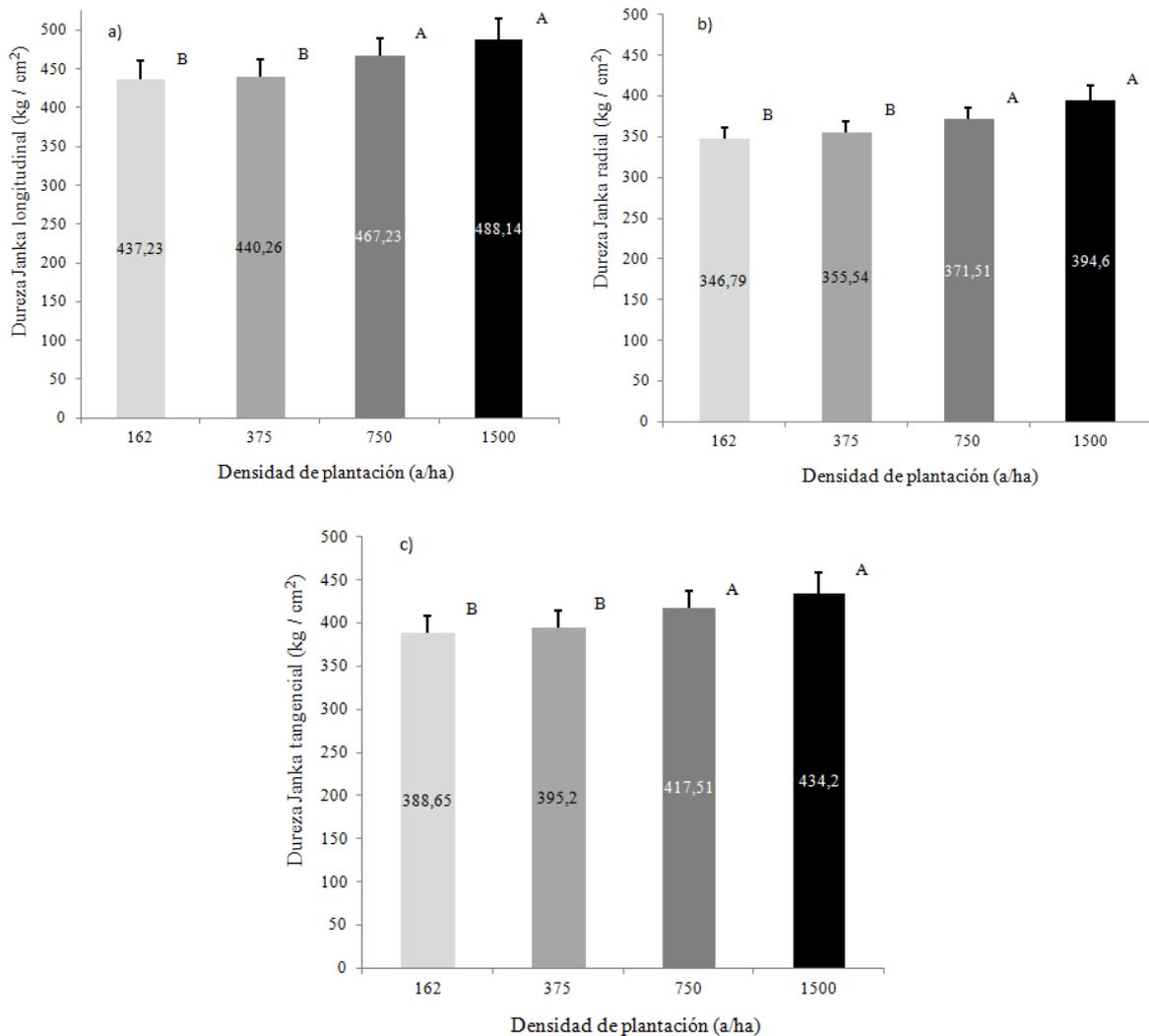


Figura 5.20. Dureza Janka según densidad inicial de plantación (a/ha). a) sentido longitudinal o axial, b) sentido radial, c) sentido tangencial. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Módulo de elasticidad y módulo de rotura

El valor promedio del módulo de elasticidad dinámico fue de 8,3 Gigapascales en los tratamientos con menores densidades de plantación y 10 Gigapascales en la mayor densidad de plantación, representando un aumento de 17 % en las propiedades estudiadas (Figura 5.21).

El valor obtenido con Metriguard dio una subestimación del 5 % en relación al valor obtenido en la máquina universal de ensayos ($MOE_d = 0,95 * MOE_E$).

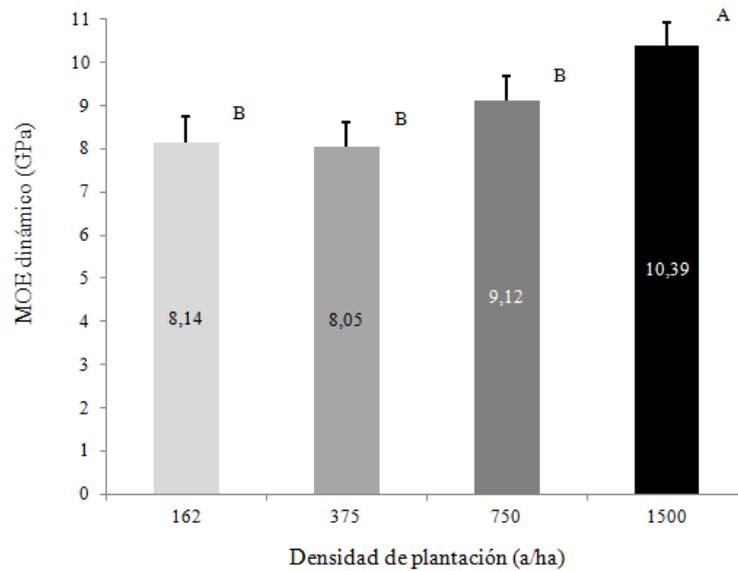


Figura 5.21. Módulo de elasticidad dinámico según densidad de inicial de plantación. Valor expresado en Gigapascales. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

Relacionando el módulo de elasticidad dinámico medio con el de tablas de las distintas secciones, el valor decreció un 10 % en tablas interiores cercanas a la médula, lugar donde se produjo el defecto de fisuras o rajaduras.

El módulo de rotura se estimó a partir del dato de MOE_d través de la función: $MOR (N/mm^2) = 4,91645 * MOE_d (GPa)$. El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica 99,20 % de la variabilidad en MOR. El error estándar del estimador mostró que la desviación estándar de los residuos es $4,05147 N/mm^2$. También se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre el tratamiento de mayor densidad de plantación con respecto a los demás (Figura 5.22). Cabe aquí recordar que $1 N / mm^2 = 10,19 kg/cm^2$.

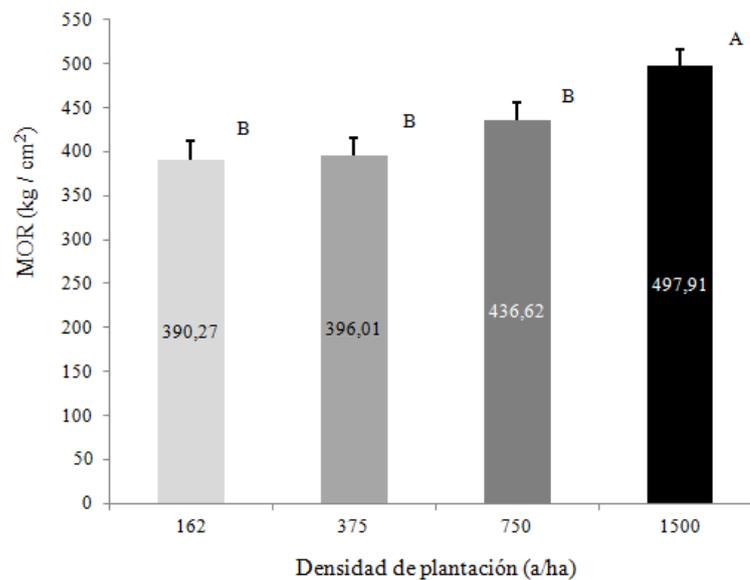


Figura 5.22. Módulo de rotura según densidad de plantación expresado en kg/cm². Medias con una letra en común no son significativamente diferentes (P>0,05)

El módulo de rotura de las tablas cercanas a la médula fue un 7,4 % menor al de las tablas de las demás secciones.

El módulo de flexión y de rotura encontrado es similar al hallado por Pereyra *et al.* (2006) para la misma especie, aunque estos autores no hacen referencia al manejo silvícola de la masa donde se extrajo el material de ensayo.

Correlación entre densidad inicial de plantación y parámetros de caracterización anatómica y propiedades físico-mecánicas de la madera

A un 95 % de probabilidad, la densidad inicial de plantación estuvo altamente correlacionada con la contracción y el hinchamiento volumétrico, la longitud de fibras, el módulo de elasticidad y el módulo de rotura. A un 90 % de probabilidad, la densidad de plantación estuvo correlacionada además con la densidad básica de la madera (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Correlación entre parámetros evaluados

		p-valores										
		a/ha	db	CV	HV	CA	LF	DF	LV	db	MOE	MOR
Coeficiente de correlación	a/ha		0,089	<u>0,023</u>	<u>0,022</u>	0,823	<u>0,014</u>	0,870	0,459	0,203	<u>0,009</u>	<u>0,005</u>
	db	0,911		<u>0,046</u>	<u>0,043</u>	0,826	<u>0,035</u>	0,695	0,742	0,522	0,100	0,091
	CV	0,977	0,955		<u>0,000</u>	0,873	<u>0,006</u>	0,931	0,652	0,327	0,055	<u>0,042</u>
	HV	0,978	0,958	0,998		0,885	<u>0,004</u>	0,915	0,644	0,327	0,052	0,039
	CA	-0,177	0,174	-0,127	-0,115		0,934	0,165	0,792	0,416	0,878	0,889
	LF	0,986	0,965	0,995	0,996	-0,066		0,835	0,585	0,315	<u>0,032</u>	<u>0,022</u>
	DF	0,130	0,305	0,069	0,085	0,835	0,165		0,636	0,901	0,766	0,775
	LV	0,541	0,258	0,348	0,356	-0,208	0,415	0,364		0,182	0,369	0,403
	DV	-0,797	-0,478	-0,673	-0,673	0,584	-0,685	0,100	-0,818		0,186	0,205
	MOE	0,991	0,892	0,945	0,948	-0,122	0,968	0,234	0,631	-0,815		<u>0,001</u>
	MOR	0,995	0,910	0,958	0,961	-0,111	0,978	0,225	0,597	-0,795	0,999	

Referencias: db, densidad básica de la madera; CV, contracción volumétrica; HV, hinchamiento volumétrico; CA, coeficiente de anisotropía; LF, longitud de fibra; DF, diámetro de fibra; LV, longitud de vaso; DV, diámetro de vaso; MOE, módulo de elasticidad; MOR, módulo de rotura.

Estas correlaciones coinciden con lo afirmado por Bolza y Kloot (1963) quienes estudiaron maderas de varias especies y afirmaron que existe una alta correlación entre el peso específico básico de la madera y sus propiedades mecánicas (Figura 5.23). Este hecho fue observado además por Kolmann (1959), Díaz Vaz y Ojeda (1980), Notivol *et al.* (1992) y León y Espinoza de Pernia (2001), quienes afirmaron que en la madera, la densidad básica es una de las propiedades tecnológicas de mayor importancia, constituyendo un criterio de evaluación apropiado además de otras características del material (propiedades físico-mecánicas).

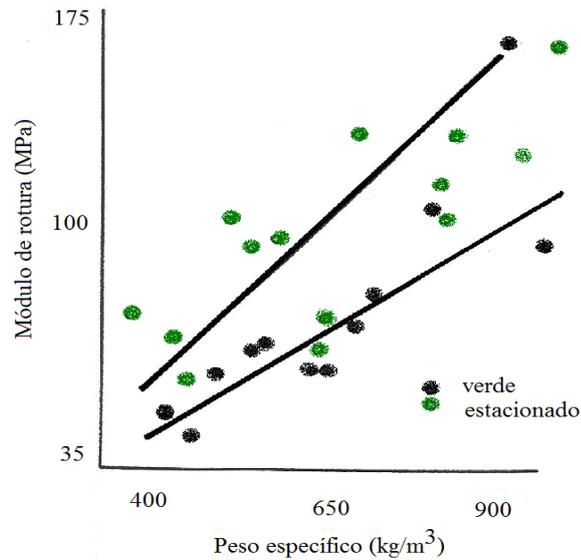


Figura 5.23. Relación peso específico de la madera verde y luego de estacionada a condiciones ambientales. Fuente: Bolza & Kloot (1963)

Grevillea robusta presentó alta correlación entre longitud de fibra y las propiedades físico-mecánicas de la madera. En concordancia con ello, Aróstegui (1982), sostuvo que las características anatómicas permiten explicar las causas correspondientes a los cambios dimensionales y las propiedades mecánicas de la madera; además, menciona que la relación entre la contracción tangencial y radial es un índice de la estabilidad de la madera y cuando la relación entre ambos se acerca a la unidad la madera es más estable y tiene buen comportamiento al secado.

CONCLUSIONES

La densidad de plantación incide en la proporción de duramen. A menor densidad de plantación mayor presencia de duramen, aunque esta disminución del duramen pasa a ser estadísticamente significativa recién al alcanzar el dosel un estado de fuerte competencia en la mayor densidad de plantación.

La densidad de plantación influye en la estructura anatómica: longitud de fibras, diámetro de fibras y vasos y sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera.

Las características anatómicas y las propiedades físico-mecánicas de posiciones radiales cercanas a la médula son afectadas negativamente en todos los tratamientos de densidad de plantación.

En *Grevillea robusta*, la mayor longitud de fibras se da en el tratamiento de mayor densidad de plantación, diferenciándose éste de los demás tratamiento de los demás.

En esta especie, la densidad de plantación afecta el diámetro de fibras, el diámetro de las mismas decrece de 162 hasta 750 a/ha, presentándose un caso particular en la densidad de 1500 a/ha.

La longitud de vasos presenta una tendencia decreciente respecto a la densidad de plantación. Es decir, a menor densidad de plantación mayor longitud de vasos.

En la menor densidad de plantación, el diámetro de vasos es mayor.

La densidad básica es mayor en el tratamiento de mayor densidad de plantación. No se dan diferencias entre los demás tratamientos.

La contracción y el hinchamiento volumétricos son mayores en los tratamientos de mayor densidad de plantación.

Hay una mayor inestabilidad de la madera cuando densidad de plantación es menor, aunque esta variación en el coeficiente de anisotropía no es importante desde el punto de vista de uso para madera de apariencia y estructural.

Los dos tratamientos con mayores densidades de plantación presentan, en las tres direcciones, mayor dureza Janka que los dos tratamientos de menores densidades de plantación, si bien esta diferencia entre los dos grupos no supera el 9 %.

A mayor densidad de plantación, al existir una fuerte competencia entre individuos, se dan los mayores valores de MOE y MOR, no hay diferencias entre los demás tratamientos, que en promedio presentaron un valor 15 % menor.

Los métodos no destructivos permiten clasificar la madera desde el punto de vista de resistencia estructural.

La densidad de plantación presenta alta correlación con la contracción y el hinchamiento volumétricos totales, con la longitud de fibras y con el módulo de elasticidad y módulo de rotura a la flexión estática.

Si bien la correlación entre la densidad de plantación y la densidad básica de la madera es más baja que la que se dio con respecto a las otras variables analizadas, su consideración es importante, debido a la estrecha relación que existe entre densidad básica y las demás propiedades físico-mecánicas.

En *Grevillea robusta* es posible emplear densidades de plantación medias a bajas sin afectar las propiedades físico-mecánicas de la madera con fines estructurales.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aróstegui A. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de Maderas Peruanas. Proyecto PNUD / FAO /PER/81/002. Lima, Perú. Documento de trabajo N° 2. 57 pp.
- ASTM D 143/52. 1966. Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. E.U. A. 810 pp.
- Baggio A. J., Caramori P. H., Androcioni A. and Montoya L. 1997. Productivity of southern Brazilian coffee plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. *Agroforestry Systems* 37(2):111-120.
- Barradas V. L. and Fanjul L. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grow coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38:101-112.
- Barth S. R. y Winck R. A. 2011. Cuantificación relativa del duramen de *Eucalyptus grandis* en función al manejo silvícola. En ponencia: Propiedades físicas de la madera de *Pinus taeda* y *Eucalyptus grandis* cultivado en Misiones y NE de Corrientes. Feria Forestal. Posadas, Misiones, Argentina.
- Barth S. R., Fassola H. E., Crechi E., Keller A., Winck R. A., Figueredo E. I. y Knebel O. E. 2012. Densidad de la madera de *Pinus taeda* L. implantado en la zona Misiones – Noreste Corrientes, Argentina, en sentido longitudinal y transversal. Actas 15^{as}. Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales-UNaM, EEA Montecarlo-INTA. Eldorado, Misiones, Argentina. 11 pp.
- Barth S. R., Giménez A. M., Joseau M. J., Gauchat M. E. y Fassola H. 2016. Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. IPEF. Brasil. *Revista Scientia Florestalis* 44 (111), en prensa.
- Bolza E. and Kloot N. H. 1963. The mechanical properties of 174 Australian Timbers. Technological paper No. 25. CSIRO, Melbourne. Pp 54.

- Bussoni A, Boscana M., Jolochin G. y Romero G. 2012. Agroforestería Rural. Posibilidades de especies no tradicionales en predios familiares. Informe final. Montevideo. Uruguay. 70 pp.
- Cabrera A. L. 1976. Regiones Fitogeográficas Argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. 2ª Edición. Tomo II. Fascículo I. Acme S.A.C.I., Buenos Aires. Argentina. 85 pp.
- Carmona R., Espinoza F. y Bull C. 2000. Influencia de la densidad de la madera en la encolabilidad de *Pinus radiata* D. Don. Revista Ciencias Forestales, Universidad de Chile 14:55-63.
- Chafe S. C. 1986. Radial variation of collapse, volumetric shrinkage, moisture content and density in *Eucalyptus regnans*. F. Muell. Wood Science and Technology 20: 253-262.
- Davel M., Jovanovski A. y Bell D. 2005. Densidad básica de la madera de Pino oregon y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. Revista Bosque 26 (3):55-62.
- De Bell D. S., Keyes C. R. and Gartner B. L. 2001. Wood density of *Eucalyptus saligna* grown in Hawaiian plantations: effects of silvicultural practices and relation to growth rate. Australian Forestry 64 (2): 106-110.
- De Lima I. L., Monteiro Borges Florsheim S. e Longui E. L. 2009. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. Lavrás. Brasil. Cerne 15 (2) 244:250.
- Denardi L. 2007. Anatomia e flexibilidade do caule de quatro espécies lenhosas para o manejo biotécnico de cursos de água. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. Brasil. 122 pp.
- Di Rienzo J. A., Guzmán A. W. and Casanoves F. 2002. A Multiple Comparisons Method based on the Distribution of the Root Node Distance of a Binary Tree. Journal of Agricultural, Biological and Environment Statistics 7(2):1-14.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Diaz Vaz J. E. y Ojeda F. 1980. Densidad Intraincremental de *Pseudotsuga menziesii*. I: Variaciones en un Análisis Fustal. Revista Bosque 3(2):86-95.
- Erickson H. D. and Harrison T. H. 1974. Douglas-fir wood quality studies. Effects of age and stimulated growth on wood density and anatomy. Wood Science and Technology 8:207-226.
- Esau K. 1985. Anatomía vegetal. Editorial OMEGA. S. A. Barcelona. España. 779 pp.

- Fassola H.E., Moscovich F.A., Domecq C.M., Ferrere P., Lacorte S.M., Hampel H., Maletti C. y Alegranza D. 2004. Regulación de la densidad en rodales de *Grevillea robusta* A. Cunn. para la producción de madera de calidad y forraje en el sur de la provincia de Misiones. RIA 33(1):15-38.
- Hardwood C. E. 1989. *Grevillea robusta*: An annotated bibliography. Editor: International council for research in agroforestry. 123 pp.
- IRAM 9543. 1966. Método de determinación de las contracciones totales, axial y tangencial y el punto de saturación de las fibras. Instituto Argentino de Racionalización de materiales. 10 pp.
- IRAM 9544. 1973. Norma para métodos de determinación de densidad aparente en maderas. Instituto Argentino de Racionalización de materiales. 10 pp.
- IRAM 9663. 2013. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. 14 pp.
- Jyske T. 2008. The effects of thinning and fertilization on Wood and tracheid properties on Norway spruce (*Picea abies*). The results on long term experiments. Forests Dissertations. Department of Forest Resource Management. Faculty of Agriculture and Forestry. University of Helsinki. 59 pp. Publicado en internet. Disponible en <http://www.metla.fi/dissertationes/df55.htm>. Activo en Agosto, 2015.
- Kollman F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Tomo I. Traducción de la 2^{da} edición. Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones. Experiencias y Servicios de la Madera. Madrid. 647 pp.
- Leon H. y Espinoza de Pernia N. 2001. Anatomía de la madera. Universidad de Los Andes. Talleres Gráficos Universitarias. Mérida, Venezuela. 397 pp.
- Ligier H. D., Matteio H. R., Polo H. L. y Rosso J. R. 1990. Provincia de Misiones. In: Atlas de Suelo de la República Argentina, V. II. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Proyecto PNUD ARG.85/019 INTA. Pp 111-154.
- Malan F. S., Hoon M. 1992. Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*. Pretoria. South African Forestry Journal 163:13-20.
- Martiarena R., Crechi, E., Pinazo M, Von Wallis A., Marquina J. y Monteoliva S. 2014. Efecto del raleo sobre el crecimiento y la densidad de la madera de *Pinus taeda* implantado en Misiones, Argentina. Revista Ciência Florestal 24 (3):655-663.
- Minghui G. and Li G. 2001. The effects of thinning intensity on wood qualities of *Tilia amurensis*. Journal of Northeast Forestry University. Harbin 29(5):26-27.
- Moglia J. G., Venturini M. y Gerez R. 2011. Relación entre el radio de duramen y algunas magnitudes alométricas en individuos selectos de *Eucalyptus camaldulensis* en Santiago del Estero Argentina. Boletín del CIDEU 10: 107-117.

- Muñiz Bolzón, G. 1993. Caracterização e desenvolvimento de Modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. Tese doutoral em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil. 252 pp.
- Notivol E., Gil L. A. y Pardos J. A. 1992. Una metodología para la estimación de la densidad de la madera de árboles en pie y su grado de variabilidad en *Pinus Pinaster* A. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. España. Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales 1(1):41-47.
- Nuñez C. E. 2005. Técnica de disgregado de material fibroso lignocelulósico con dióxido de cloro y carbonato de sodio. Programa de Investigación de Celulosa y Papel. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Posadas. Misiones. Argentina. 6 pp.
- Parker M. L., Hunt K., Warren W. and Kennedy R. 1976. Effect of thinning and fertilization on intra-ring characteristics and kraft pulp yield of Dougals-fir. XXVIII Applied Polymer Symposium. Pp. 1075-1086.
- Pereyra O., Suirezs T. M., Pitsch C. y Báez R. 2006. Estudio de las propiedades físico-mecánicas y comportamiento en procesos industriales de la madera de Kiri, *Grevillea*, Paraíso y Toona. Revista Floresta 36(2): 213-223.
- Pezzopane, J. R. M.; Júnior, M. J. P.; Thomaziello, R. A. e Camargo, M. B. P. 2003. Metodologia e Técnica Experimentais. Escala para Avaliação de Estádios Fenológicos do Cafeeiro Arábica. *Bragantia*, Campinas 62(3): 499-505.
- Pezzopane J. R. M., Pedro Júnior M. J. e Gallo P. B. 2007. Caracterização microclimática em cultivo consorciado café/banana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11(3):256-264.
- Pezzopane, J. R. M.; Souza, P. S. de; Rolim, G. e Gallo, P. B. 2011. Microclimate in coffee plantation grown under *Grevillea* trees shading. *Acta Scientiarum. Agronomy* 33(2):201-206.
- Píccolo G. A., Goya J. F., Grangi J. L., Arturi M. y Vaccaro S. 2012. Evaluación de indicadores de calidad de suelo en ecosistemas de Misiones. INTA Cerro Azul. Misiones. Argentina. *Revista Compartiendo Tecnología* 2(1):23-29.
- Plomion C., Leprovost G. and Stokes A. 2001. Wood Formation in Trees. *Plant Physiology*, Bethesda, 127(4):1513-1523.
- Pryor L. D. 1967. *Eucalyptus* in plantations: Present and future. En: FAO World Symposium on man made forests and their industrial importance, Canberra. Australia Proceeding. 2:993-1008.
- Sette Junior C. R. 2007. Efeito da aplicação do lodo de esgoto e de fertilização mineral no crescimento e propriedades da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex

- Maiden. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)–Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. Brasil. 152 pp.
- Skolmen R. G. 1972. Specific gravity variation in *Eucalyptus robusta* grown in Hawaii. Berkeley, Calif., Pacific SW. Forest & Range Exp. Stn. USDA Forest Serv. Res. Paper PSW-78. 7 pp.
- Taylor A. M., Gartner B. L. and Morrell J. J. 2002. Heartwood formation and natural durability. A review. Wood and Fiber Science 34(4): 587-611.
- Toledo D. M., Galantini J. A., Ferreccio E., Arzuaga S., Gimenez L. y Vázquez S. 2014. Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. Ciencia del suelo 31(2):201-212.
- Tomazello Filho, M. 1985. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. Revista IPEF 29: 37-45.
- Trevisan, R.; Souza, J.T.De; Denardi, L.; Haselein, C.R.; Santini, E.J. 2013. Efeito do desbaste no comprimento das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Ciência Florestal 23(2): 461-473.
- Tsoumis G. 1991. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold. 494 pp.
- Velásquez J., Toro M. E., Gómez L., Terzo F. M. and Márquez A. 2009. Axial and radial variation pattern in the specific gravity of the wood of *Erisma uncinatum* Warm. Revista Interciencia 34 (12): 873-879.
- Wilcox, C.D.; Dove, S.B.; Mc David, W. D. and Greer, D.B. UTHSCSA Image Tool Versión 2002. Department of Dental Diagnostic Science at the University of Texas. Health Science Center, San Antonio, Texas. United State of America. URL: <http://compdent.uthscsa.edu/dig/itdesc.html>.
- Wilkins A. P. 1991. Sapwood heartwood and bark thickness of silviculturally treated *Eucalyptus grandis*. Wood Science Technology 25 (6): 415-423.
- Winck R. A., Fassola H. E., Barth S. R., Keller A. E. y Crechi E. H. 2013. Variación de la densidad básica de *Eucalyptus grandis* para diferentes edades y zonas agroecológicas de la región mesopotámica. Actas IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú. Misiones. Argentina. 2 Pp.
- Winck R. A. 2013: Influencia del raleo sobre las características anatómicas y las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. de la región NE de la Argentina. Tesis de Maestría en Madera, Celulosa y Papel. Orientación Tecnología de la Madera. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Posadas. Misiones. Argentina. 102 pp.
- Zobel B. J. and Van Buijtenen J. P. 1989. Wood variation: its causes and control. Springer-Verlag. Berlin. 363 pp.

ASERRADO Y CLASIFICACIÓN DE LA MADERA SEGÚN GRADO DE CALIDAD

INTRODUCCIÓN

En la Argentina funcionan unas 7580 empresas vinculadas a la industria de la madera; 2425 son aserraderos (industrias que realizan la primera y segunda transformación de la madera) y 5156 son empresas de bienes finales, como fabricantes de muebles, las cuales brindan empleo a cerca de 65000 personas en todo el país. Solo en Misiones, para el año 2009, de acuerdo al censo de la Federación Argentina de la Industria Maderera y Afines, según datos del Ministerio de Economía de la Nación, la Unión de Sindicatos de la Industria Maderera de la República Argentina y el Sistema de Información Foresto-Industrial (SIFIP), se registraron 971 industrias en funcionamiento, de las cuales 600 son aserraderos, 140 fábricas de muebles, además de carpinterías de obra y pisos, envases y remanufacturas, dando empleo a 9.970 personas. El 95 % son empresas pequeñas y medianas (PyMES). En los últimos años Misiones y Corrientes proveen el 70 % de la madera que consume la Argentina. En Misiones, la extracción de productos maderables originarios del bosque nativo está siendo reemplazada por madera de plantaciones forestales. A pesar de que la industria forestal basada en productos de madera sólida en Misiones y en el noreste de Corrientes es, en cierta forma, muy diversificada (aserrados, compensados, tableros reconstituidos, impregnación, remanufacturas), el avance hacia una mayor industrialización se mantuvo limitado. Si bien a partir de 1990 se dio auge a la industria remanufacturera de madera, este avance no fue notorio en la industria del mueble (SPE-MEFPN, 2010). Un 56 % de las empresas, especialmente PyMES, no lleva una contabilidad sistematizada, el 67 % de las empresas no realiza costeos y el 68 % de las empresas no realiza mediciones de productividad (Naselli y Leibas, 2008). Por estos antecedentes se recomienda profundizar la concientización del sector acerca de la importancia de conocer estos aspectos. En el presente trabajo se realizó un análisis del rendimiento de madera aserrada de *Grevillea robusta*, una de las especies forestales

implantadas en la región, y actualmente empleada como madera sólida. Más allá del mero conocimiento de su aprovechamiento, interesa analizar el grado de calidad de la madera obtenida del aserrado según una tipificación por apariencia. Se considera como rendimiento en madera aserrada (porcentaje de aprovechamiento) a la relación entre el volumen de madera aserrada obtenido y el volumen de la troza antes del aserrío (Valerio *et al.*, 2007). Dicho rendimiento es afectado por factores como: especie, esquema de corte, tecnología de la maquinaria empleada para la realización del corte, dimensiones de las trozas aserradas, ahusamiento o conicidad, calidad interna de la troza (Steele, 1984; Rocha, 2000; Murara *et al.*, 2005; Valerio *et al.*, 2007; Vital, 2008). Estos últimos factores son influenciados por el manejo silvícola, que, en el caso analizado, involucra la densidad de plantación (Mäkelä *et al.*, 2010; Fassola *et al.*, 2012).

Estudios realizados en Argentina consideraron las propiedades internas de rollizos podados de *Pinus taeda* (Fassola *et al.*, 2002), aunque la generación de una base de datos para predecir valores brutos y por grados de calidad de madera aserrada se encuentra en proceso de construcción (Fassola *et al.*, 2012). Es posible mencionar algunos estudios iniciales sobre los rendimientos en el aserrado de coníferas sometidas a distintos regímenes silvícolas, analizados bajo normas factory (normas para productos remanufacturados de madera tales como molduras, partes de puertas y ventanas y finger-joint) y otras normas de clasificación según grados de apariencia para madera destinada a la industria del mueble (Fassola *et al.*, 2010; Winck *et al.*, 2015). Las normas de calidad determinan las características de los productos que han tenido una transformación industrial, tales como dimensiones, cualidades físicas y químicas. Teniendo en cuenta estos aspectos, para madera estructural es importante conocer las propiedades físico-mecánicas, para la industria del mueble y carpintería de obra, destinataria principal de la madera aserrada de *Grevillea robusta*, es de mayor importancia la calidad según grado de apariencia (Andía y Keil, 1996).

Ante la complejidad del planeamiento de la producción forestal, la comprensión de la incidencia de la densidad de plantación en la producción y calidad de la madera a obtener es una herramienta fundamental para la toma de decisiones. El conocer las consecuencias productivas de distintas estructuras de la masa permitirá decidir el manejo silvícola más adecuado para optimizar el rendimiento de la producción de un rodal, atendiendo a los requerimientos de calidad del mercado. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar la

influencia de la densidad inicial de plantación y la posición sociológica de *Grevillea robusta* en el rendimiento en aserrado y la calidad de la madera según grados de apariencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La madera aserrada provino de individuos apeados en el ensayo de densidad inicial de plantación descrito previamente en el Capítulo 2.

De cada individuo se industrializaron 2 trozas de largo variable entre de 2,5 y de 4 m, según factibilidad dimensional y ausencia de defectos que disminuyeran el aprovechamiento o inutilizaran parte de la madera. Luego del apeo, se pintaron los extremos de las trozas a fin de mantener su trazabilidad en el proceso de aserrado y se llevaron a un aserradero. Para la determinación del rendimiento, se realizó la cubicación de las trozas a partir de medidas de longitud y diámetro con corteza tomados en los extremos de las mismas. El volumen fue calculado a través de la fórmula de Smalian según la expresión:

$$V = (((\pi*d_1)/40000)+ ((\pi*d_2)/40000))/2)*L \quad 6.1$$

Donde, V es el volumen de la troza (m³); d₁, el diámetro con corteza (cm) en punta gruesa de la troza (cm); d₂, el diámetro con corteza (cm) en punta fina de la troza; L, la longitud de la troza (m).

El ahusamiento por troza fue expresado como cm de adelgazamiento por metro de longitud (Vignote y Martínez, 2005), habiendo sido calculado como:

$$(d_1 - d_2)/L \quad 6.2$$

Donde: d₁, el diámetro con corteza (cm) en punta gruesa de la troza (cm); d₂, el diámetro con corteza (cm) en punta fina de la troza; L, la longitud de la troza (m).

Las trozas fueron descortezadas y aserradas, extrayéndose dos costeros y un semibloque. El semibloque siguió su procesamiento obteniéndose un bloque central y dos costeros más. El bloque central fue aserrado mediante sierras circulares múltiples en piezas de 2,54 cm (1 pulgada) de espesor (Figura 6.1). Los costeros fueron reaserrados para la obtención de una pieza utilizable de una pulgada de espesor y un mínimo de 7,62 cm (3 pulgadas de ancho). Cada tabla fue cubicada a partir de sus dimensiones reales, ya que para

el aserrío se consideró una sobremedida tomando en cuenta la contracción volumétrica propia de la especie. Finalmente se obtuvo el rendimiento por troza, árbol y por tratamiento (densidad de plantación), a partir de la expresión matemática:

$$R = ((\sum v_i) / v_1) * 100 \quad 6.3$$

Dónde, R es el rendimiento en madera aserrada (%); $\sum v_i$ = sumatoria de los volúmenes de las tablas provenientes de la troza i (m^3); v_1 , el volumen total sin corteza de la troza que originó las tablas (m^3). Luego, el rendimiento por árbol fue igual a la sumatoria del rendimiento de cada una de sus trozas.



Figura 6.1. Fotografía mostrando detalle de: a) trozas aserradas, b) piezas aserradas con marcación de trazabilidad.

La madera aserrada se cepilló y luego se clasificó según el grado de apariencia. Se priorizó la obtención de piezas de mayor valor económico para carpintería, empleándose para ello una adaptación de la norma de tipificación desarrollada para maderas duras por la National Hardwood Lumber Association (NHLA, 2002). Se tomó en cuenta la proporción de madera libre de defectos para cada grado (Figura 6.2). Se consideraron cuatro calidades: FAS (tablas selectas adecuadas para molduras de mayor longitud con destino a carpinterías para elaboración de marcos de puertas, revestimientos interiores y muebles), N1 (tablas aptas para partes de muebles como armarios de cocina o bibliotecas, son piezas sin defectos visuales pero de menor longitud) y N2 (tablas sin defectos de dimensión no superior a 60 cm). Además, N2 no son tablas que no clasifican por ancho menor a tres pulgadas. No se realizó reaprovechamiento de piezas cortas (menores a 2,5 m de longitud).

Además del efecto de la densidad de plantación, se analizó el efecto de la competencia entre individuos, para ello se consideró el rendimiento según calidad de madera en individuos de clase diamétrica superior (D: diámetros superiores a 30 cm), media (CD: diámetros entre 20 y 30 cm) e inferior suprimidos (S: diámetros de hasta 20 cm).

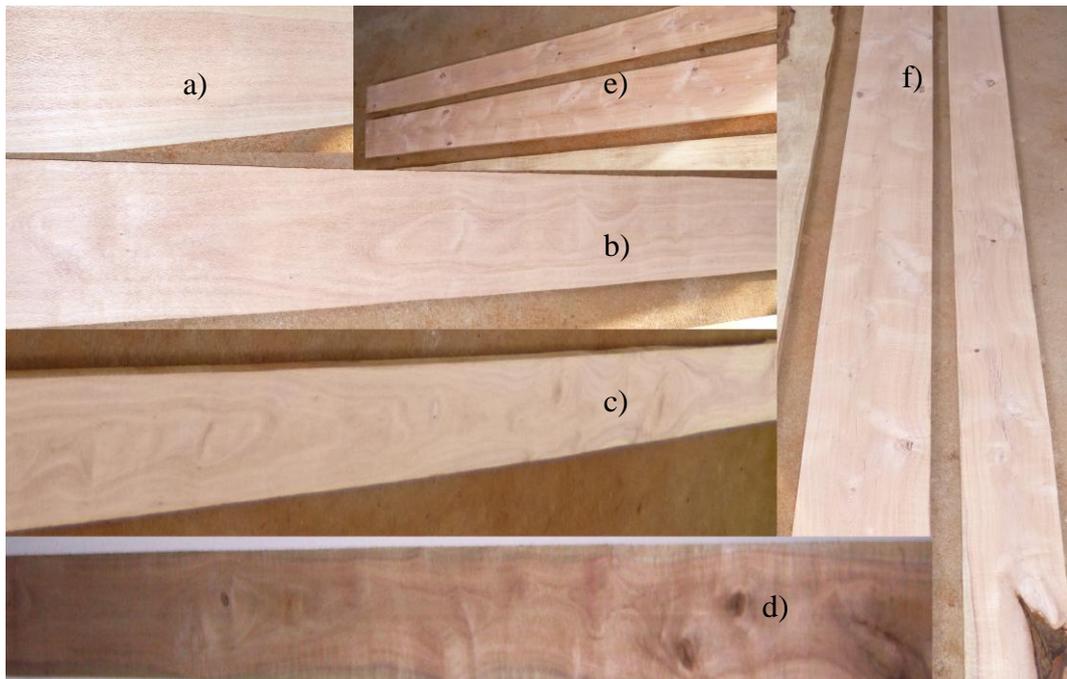


Figura 6.2. Tablas según grado de calidad. a y b, FAS; c, N1; d, e y f, N2

Para el procesamiento estadístico de los datos se empleó el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015). Para la evaluación de tendencias se aplicaron ajustes de distintas funciones. Las variables de rendimiento analizadas, según densidad de plantación, a nivel individual y de rodal, fueron: rendimiento general del individuo, rendimiento de la troza 1, rendimiento de la troza 2 y rendimiento por hectárea. En relación a la influencia de la posición sociológica del individuo, se evaluó el rendimiento general del individuo sin diferenciar en cuanto a número de troza. El análisis de variancia se realizó a través de modelos mixtos, considerando, según el análisis, efectos fijos (densidad de plantación, posición respecto a la médula) y aleatorios (árbol, parcela). El test de comparación empleado fue DGC (Di Rienzo *et al.*, 2002). En todos los casos se trabajó con nivel de confianza de 0,05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento en aserrado. Tipificación según apariencia

El análisis estadístico no arrojó diferencias significativas ($P < 0,05$) entre densidades iniciales de plantación, con la excepción del tratamiento de 750 a/ha, el que dado a su acumulación de biomasa tal lo expresado en el capítulo 2, puede ser el punto de inflexión que indique un aprovechamiento óptimo de los recursos (Figura 6.3).

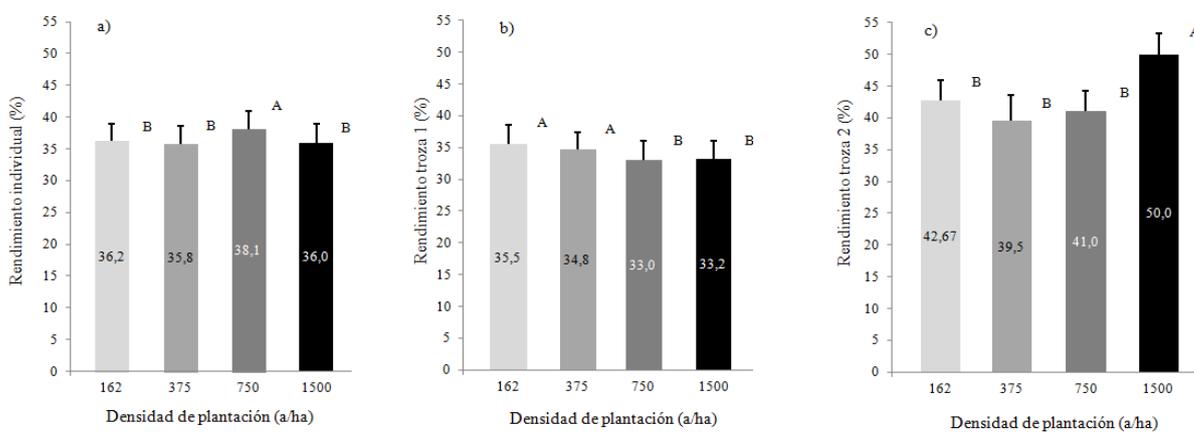


Figura 6.3. Rendimiento de aserrado según densidad de plantación. a) rendimiento general por árbol, b) rendimiento de la troza 1 (basal), c) rendimiento de la troza 2. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$)

El rendimiento por árbol fue superior a 35,8 % en todas las densidades de plantación consideradas.

El rendimiento en el aserrado de la primer troza presenta mayor rendimiento (35,8 %) a menor densidad de plantación, en coincidencia con las mayores dimensiones de las trozas que se da en dicho espaciamiento (Tabla 6.4). El rendimiento de las mayores densidades de plantación decrece, obteniéndose valores inferiores a 34 % a densidades de 750 y 1.500 a/ha. En la segunda troza el rendimiento es mayor ($P < 0,05$) en el tratamiento de mayor densidad de plantación, que alcanza 50 %, esto se debe a una menor conicidad de la misma (Tabla 6.1). Este comportamiento del ahusamiento es mencionado también por Dobie (1966). En espaciamientos mayores ($P < 0,05$) el rendimiento decrece a valores entre 38 y 43 %, no existiendo diferencias significativas entre ellos.

Tabla 6.1. Ahusamiento de la troza (cm/m)

Tratamiento	Troza			
	1		2	
162	3,86 A	(0,37)	1,57 A	(0,40)
375	4,05 A	(0,39)	1,46 A	(0,42)
750	3,27 B	(0,50)	1,82 A	(0,58)
1.500	3,1 B	(0,27)	0,87 B	(0,31)

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$). Valores entre paréntesis corresponden al error estandar del modelo

Analizando lo sucedido a nivel de árboles individuales y clasificadas las tablas por grado de apariencia (Tabla 6.2.), la mayor proporción de las tablas de la mejor calidad de madera según grado de apariencia (Σ FAS + N1), se logró con los tratamientos de menor densidad de plantación. En tanto que, en los tratamientos con mayores densidades de plantación, predominan tablas de las calidades inferiores (Σ N2 + N2 nc).

Tabla 6.2. Rendimiento por grado de calidad según densidad de plantación. Valores expresados en porcentaje

Calidad de madera	Densidad de plantación (a/ha)			
	162	375	750	1500
FAS	31 A	15 B	15 B	22 B
N1	12 B	25 A	19 A	15 A
N2	17 A	10 A	2 B	14 A
N2 nc	40 B	50 A	64 A	49 B
FAS + N1	43 A	40 A	34 B	37 B
N2 + nc	57 B	60 B	66 A	63 A

FAS: madera sin defecto visual con destino a revestimientos interiores, marcos de puerta y muebles, N1: piezas sin defecto visual pero de menor longitud empleadas para partes de muebles, N2: tablas sin defecto con longitud de 60 cm o menos, N2 nc: tablas que no clasifican por tener un ancho menor a tres pulgadas (7,62 cm)

Observando el rendimiento de la troza 1 (Tabla 6.3), expresada por grado de apariencia, se puede observar que los rendimientos en calidad FAS se alcanzaron en los tratamientos de 1.500 y 162 plantas por hectarea, con un valor de 25% y 36% respectivamente. La no diferenciación entre las densidades extremas puede deberse a que cuando aumenta la densidad la conicidad de las trozas es menor (Tabla 6.1). No se observó un comportamiento patrón en los rendimientos de la calidad de la madera de la 1º troza según grados de apariencia de acuerdo a la densidad de plantación.

Tabla 6.3. Rendimiento de aserrado en troza 1 por grado de calidad, según densidad de plantación. Valores expresados en porcentaje

Calidad de madera	Densidad de plantación (a/ha)			
	162	375	750	1500
FAS	36 A	16 B	15 B	25 A
N1	5 B	25 A	18 A	15 A
N2	14 A	9 B	0 B	20 A
N2 nc	45 B	50 B	67 A	40 B

FAS: madera sin defecto visual con destino a revestimientos interiores, marcos de puerta y muebles, N1: piezas sin defecto visual pero de menor longitud empleadas para partes de muebles, N2: tablas sin defecto con longitud de 60 cm o menos, N2 nc: tablas que no clasifican por tener un ancho menor a tres pulgadas (7,62 cm)

Al analizar los rendimientos de la segunda troza aserrable (Tabla 6.4), en el tratamiento de 162 a/ha se obtuvo la mayor proporción de madera de la mejor calidad (FAS). En las 3 menores densidades de plantación, se alcanzaron mayores rendimientos según grados de apariencia para N1, también con mayor incidencia de tablas N2 en los tratamientos de 162 y 375 a/ha. Las tablas N2 nc predominan en los tratamientos más densos.

Tabla 6.4. Rendimiento de aserrado en troza 2 según densidad de plantación. Valores expresados en porcentaje según grado de calidad

Calidad de madera	Densidad de plantación (a/ha)			
	162	375	750	1500
FAS	22 A	12 B	14 B	15 B
N1	25 A	19 A	22 A	15 B
N2	23 A	17 A	6 B	1 B
N2 nc	30 B	52 A	58 A	69 A

FAS: madera sin defecto visual con destino a revestimientos interiores, marcos de puerta y muebles, N1: piezas sin defecto visual pero de menor longitud empleadas para partes de muebles, N2: tablas sin defecto con longitud de 60 cm o menos, N2 nc: tablas que no clasifican por tener un ancho menor a tres pulgadas (7,62 cm)

Si bien analizando el rendimiento general en aserrado por tratamiento y por posición sociológica la diferencia entre estratos no supera 3 % (Figura 6.3 y Figura 6.4), para interpretar su significancia es importante tomar en cuenta lo que sucede si se considera la distribución diamétrica de cada densidad de plantación (Tabla 6.5)

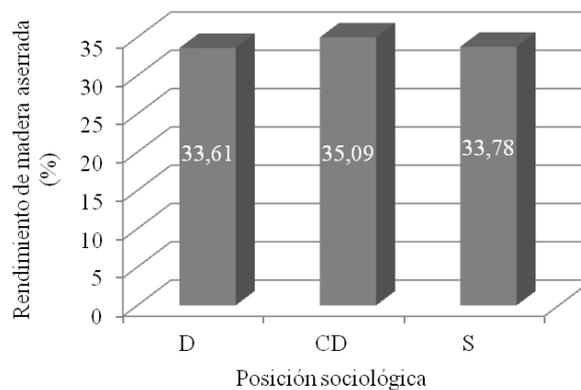


Figura 6.4. Rendimiento en aserrado según posición sociológica de los individuos. CD: árbol codominante, S: árbol suprimido, D árbol dominante

En los tratamientos con mayores densidades de plantación se encuentran una mayor presencia de árboles en condición de suprimidos, mientras que en los tratamientos de menores densidades de plantación hay una mayor participación relativa de individuos dominantes y codominantes (Tabla 6.5).

Tabla 6.5. Distribución diamétrica porcentual según densidad de plantación

Densidad de plantación (a/ha)	% árboles		
	dominantes	codominantes	suprimidos
162	72	24	4
375	52	38	10
750	46	30	24
1500	30	24	46

Dentro de esta distribución sociológica es además importante para analizar el rendimiento en aserrado, considerar lo que sucede entre estratos con la calidad de la madera aserrada a obtener (Figura 6.5).

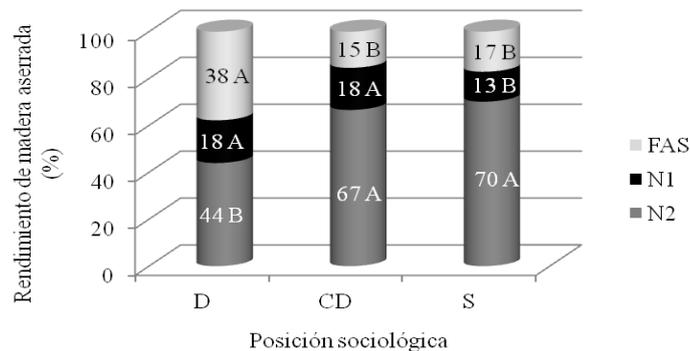
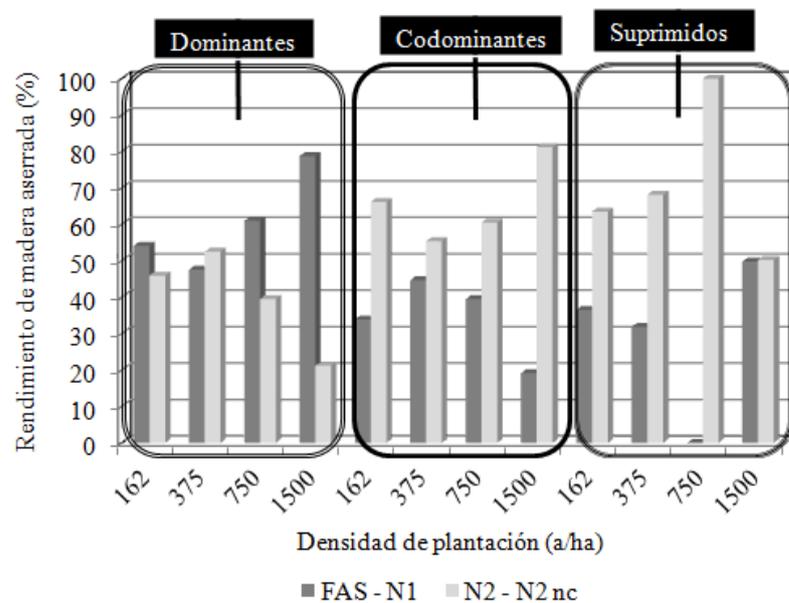


Figura 6.5. Rendimiento en aserrado según posición sociológica y grado de calidad evaluado por su grado de apariencia. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$). D: árbol dominante, CD: árbol codominante, S: árbol suprimido

Se puede observar en la Figura 3 que las tablas de primera calidad (FAS) predominan en los individuos de la mayor clase diamétrica y su presencia decrece para las clases diamétricas inferiores. Los árboles de las clases diamétricas superiores (dominantes y codominantes) evidenciaron una mayor proporción de madera de calidad N1 que los de la clase diamétrica inferior (suprimidos). El mayor volumen de madera de calidad N2 se corresponde a los árboles que crecieron con mayor competencia entre individuos. Se

observó un comportamiento patrón, la clase N2 disminuyó con el aumento en diámetro de los individuos, alcanzando valores de 70, 67 y 44 para los árboles suprimidos, codominantes y dominantes respectivamente.

Con respecto a los grados de calidad de la madera aserrada en los distintos tratamientos y posición sociológica (Figura 6.6), los árboles de la clase diamétrica superior, si bien en distinta proporción, mantienen un mayor volumen de madera de la mejor calidad en todas las densidades de plantación ($P < 0,05$), con excepción del tratamiento de 375 a/ha. En todos los casos, los individuos de las clases diamétricas media e inferior tuvieron mayor proporción de madera de calidad inferior.



FAS: madera sin defecto visual con destino a revestimientos interiores, marcos de puerta y muebles, N1: piezas sin defecto visual pero de menor longitud empleadas para partes de muebles, N2: tablas sin defecto con longitud de 60 cm o menos, N2 nc: tablas que no clasifican por tener un ancho menor a tres pulgadas (7,62 cm)

Figura 6.6. Rendimiento en madera aserrada según posición sociológica y densidad de plantación

En este estudio, el volumen del árbol codominante y el suprimido representaron el 63 y 40 % del volumen del árbol dominante, respectivamente.

Respecto al volumen absoluto, las menores densidades de plantación ($P < 0,05$) presentaron un mayor volumen individual y por ende, un mayor volumen en tablas obtenidas por troza (Figura 6.7). El mayor volumen de madera de las mejores calidades

(para la industria del mueble y aberturas en general) se encontró en el tratamiento de menor densidad de plantación (Figura 6.8).

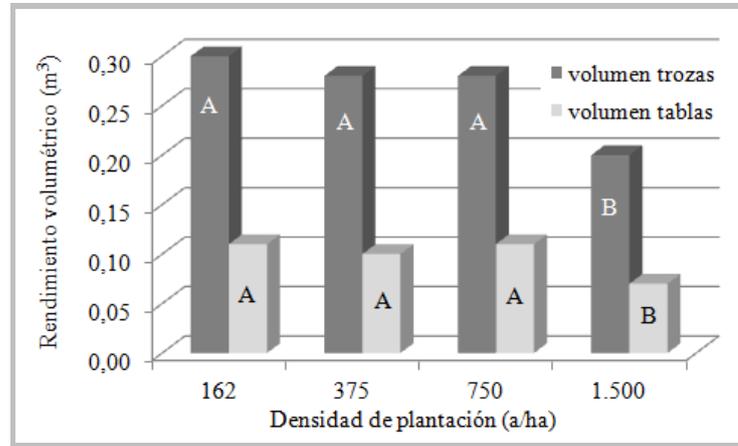


Figura 6.7. Rendimiento volumétrico medio de árboles individuales según densidad de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

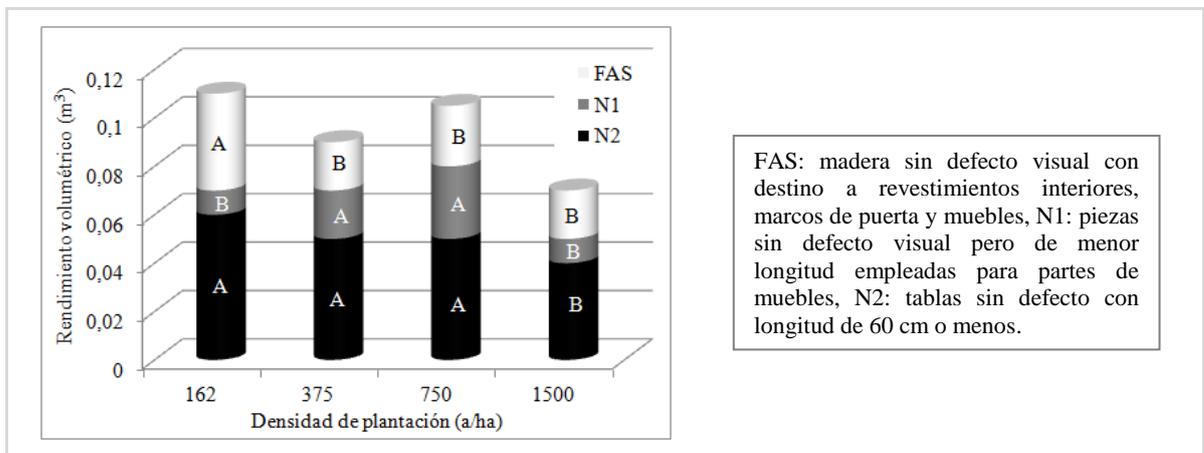


Figura 6.8. Rendimiento volumétrico medio de madera aserrada de árboles individuales según calidad y densidad de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

Es importante considerar el mayor número de individuos por hectárea en las densidades mayores, ya que esto tiene influencia en el volumen total de madera producida (Bernardo *et. al.*, 1998; Crechi *et. al.*, 1993). Por este motivo se presenta en la Figura 6.9 un análisis comparativo de rendimiento en función a grado de calidad por tratamiento, considerando lo sucedido a nivel de rodal.

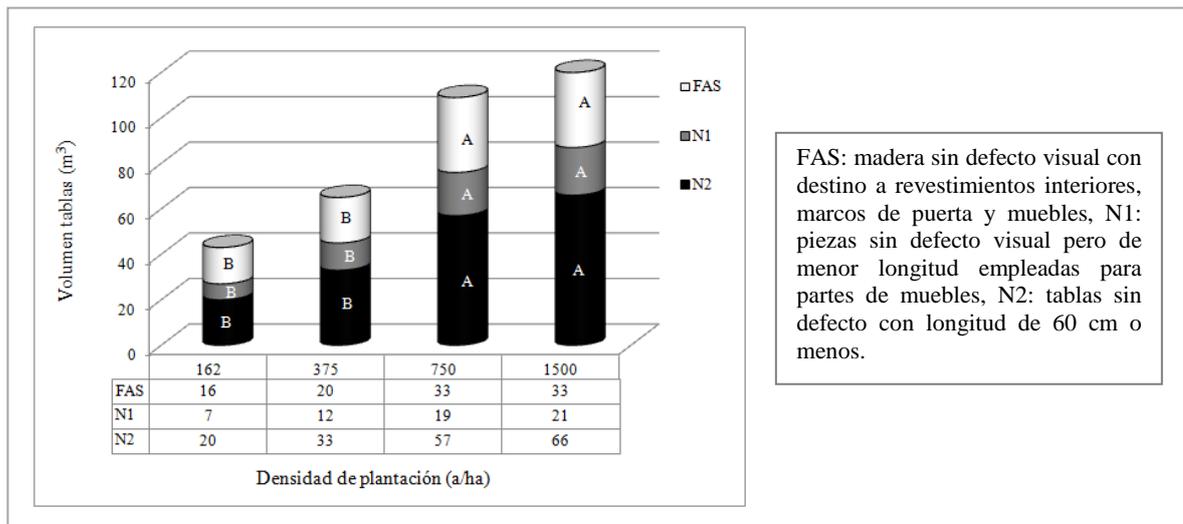


Figura 6.9. Rendimiento volumétrico medio de madera aserrada del rodal según calidad y densidad de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

Una mayor densidad de plantación (1500 y 750 a/ha) produjo un mayor volumen de madera de calidad FAS ($P<0,05$). No obstante, es indispensable tomar en cuenta no solo el volumen de producto sino también el requerimiento del mercado en cuanto a dimensiones mínimas de las tablas según uso. Para piezas de carpintería de mayores dimensiones se prefiere un ancho mayor a 141 mm (6 pulgadas). Menores densidades de plantación (375 y 162 a/ha) dieron lugar a más del 60 % de las tablas con anchos superiores a 180 mm (Figura 6.10).

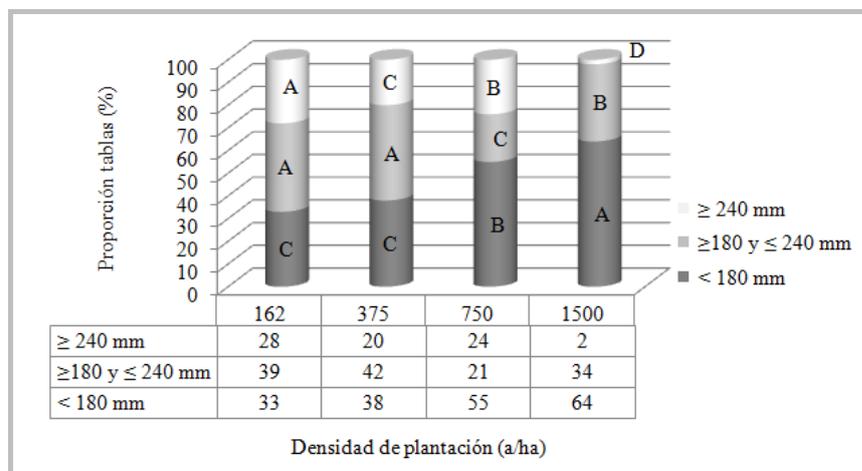


Figura 6.10. Proporción de tablas a obtener según ancho y densidad de plantación. Medias con una letra en común no son significativamente diferentes ($P>0,05$)

Un análisis del ancho medio de tablas a obtener por densidad de plantación indica que con 1500 a/ha se obtiene un valor de 143 mm, este valor se incrementa a 164 mm para 750 a/ha, no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre ambas. Estas diferencias surgen respecto a los tratamientos de menor densidad de plantación, 375 a/ha da una tabla de ancho medio de 185 mm y para 162 a/ha dicho valor es de 187 mm, sin diferencia entre ellos.

La industria de la primera transformación de la madera en la zona se caracteriza por ser poco eficiente en el proceso de aserrado, sólo en aserraderos de alta producción se alcanza un rendimiento medio de 50 %. Las industrias de menor tamaño y por ende menor tecnología y formación del personal, alcanzan un rendimiento cercano a 40 % (Martínez Pastur *et al.*, 2004; Baccon, 2010; Videla D., 2015, com. pers.). El resto del material de la troza queda en forma de costeros, recortes y testas, virutas y aserrín. Hernández *et al.* (2014) mencionan para *Eucalyptus dunnii* un rendimiento de 44, 2 %. Olandoski *et al.* (1997) cita para *Pinus* sp. un rendimiento de aserrado de 51 % y Cademaretori (2010) encontró para *Pinus elliottii* un rendimiento medio de aserrado de 38,6 %. En este estudio *Grevillea robusta* arrojó un rendimiento general de trozas aserradas de entre 36 y 38 %. Distintos investigadores concuerdan con Fahey y Sachet (1993) en que la dimensión de las trozas es uno de los factores que más influyen en el rendimiento del aserrado. Esta afirmación no pudo ser comprobada en forma contundente en *Grevillea robusta*. Rocha (2000) menciona que trozas de menor diámetro presentan menores rendimientos, en *Grevillea robusta* esto se dio solo en la primera troza aserrada. No obstante, se debe tener en cuenta la disminución en la variedad de productos a obtener de trozas de menor dimensión, al no ser adecuadas para tablas de determinadas dimensiones y características de calidad según las normas empleadas para su tipificación (Murara Júnior, 2005 y Murara Júnior *et al.*, 2005).

Otros factores que influyen en el rendimiento son la longitud de trozas, su ahusamiento y el diagrama de corte empleado en el aserrío. Por este motivo la segunda troza de *Grevillea robusta*, en especial en el tratamiento de menor ahusamiento (Tabla 6.1), presentó un mayor rendimiento (Figura 6.3 c). En este caso no se produjo un reaprovechamiento de piezas de menor longitud. Tampoco se implementó el mejor diagrama de corte para *Grevillea robusta*, esto se debió a que no todos los tratamientos

permitieron su implementación dada las dimensiones de su troza. Un esquema de corte radial en cuarterones optimizaría el veteado característico de la especie.

La decisión de la densidad de plantación estará vinculada a requerimientos dimensionales del mercado y precio diferencial dado por apariencia y dimensión. No es suficiente considerar tan solo la maximización del volumen del rodal. Por ende, es probable que a una densidad de 1500 a/ha no es adecuada, resultando más apropiado el rango entre 750 y 162 a/ha según el producto buscado.

CONCLUSIONES

La densidad de plantación y por ende la distribución diamétrica de los árboles de *Grevillea robusta* afectan la calidad (expresada en grados de apariencia) y rendimiento de la madera.

Considerando el rendimiento general por árbol, sin diferenciar por troza aserrable, no existe evidencia de diferencia en rendimiento de aserrado según densidad de plantación, con excepción del tratamiento de 750 a/ha que presentó mayor rendimiento individual.

El rendimiento porcentual en aserrío de la primera troza es mayor a menores densidades de plantación.

En la segunda troza aserrable la mayor densidad de plantación presenta mayor rendimiento porcentual debido a su menor conicidad.

A nivel de árbol individual, las menores densidades de plantación dan lugar a mayor proporción de la madera de las mejores calidades tipificadas según grado de apariencia.

Diferenciando la madera por troza de acuerdo a su calidad, la mayor y la menor densidad de plantación tienen la mayor presencia de madera de la mayor calidad para usos a la vista no pudiéndose establecer un patrón de comportamiento. En la segunda troza la representación de las tablas de estas características es mayor en el tratamiento de menor densidad de plantación.

El rendimiento en madera aserrada es similar en las tres clases diamétricas consideradas.

A menores densidades de plantación hay una mayor presencia de árboles de la clase diamétrica superior con un mayor rendimiento individual en madera de las mejores

calidades. Los individuos de las clases diamétricas media e inferior dan mayor proporción de tablas de calidades menores.

A nivel de rodal, las mayores densidades de plantación concentran el mayor volumen de madera de la mejor calidad pero de menores dimensiones.

Densidades de 375 y 162 a/ha brindan tablas con un ancho promedio superior a 185 mm (\cong 6 pulgadas) en más del 50 % de las piezas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Andía I. y Keil G. 1996. Tipificación de la madera. Criterios y Metodología. Clasificación por Aspecto. Industrias Forestales I. Departamento de Tecnología e Industrialización de la Madera. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. Buenos Aires. Argentina. 51 pp.
- Baccon, M. H. 2010. Determinación del incremento de rendimiento de madera de calidad en aserrado de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, proveniente de plantaciones con manejo forestal. Tesis de grado. Ingeniería en Industria de la Madera. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Misiones. 50 pp.
- Barth S. R., Giménez A. M., Joseau M. J., Gauchat M. E. y Fassola H. 2016 a. Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. IPEF. Brasil. Revista Scientia Florestalis 44 (111), en prensa.
- Barth S. R., Giménez A. M., Joseau M. J., Gauchat M. E., Fassola H. E. y Crechi E. H. 2016 b. Comportamiento dendrométrico de *Grevillea robusta* A. implantada en Misiones, Argentina, a distintas densidades iniciales de plantación. Revista Yvyrareta. FCF-UNaM. Misiones. Argentina. En prensa.
- Bernardo A.; Reis M. L., Reis G. F., Harrison R. G. and Firme D. J. 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita*, *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. Forest Ecology and Management. 104: 1 – 13.
- Cademartori P. H. G. de. 2010. Qualidade da madeira serrada de *Pinus elliottii* Engelm procedente de florestas resinadas da região Sul do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. Brasil. 82 pp.
- Crechi E., Fernández R., Fassola H y Reboratti H. 2003. Efectos de la densidad de plantación sobre el crecimiento y la producción en *Eucalyptus grandis* a la edad de 6 años. En: 10º Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF-INTA. Eldorado, Misiones, 25-27/09/03. 12 pp.

- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Di Rienzo J. A., Guzmán A. W. Y Casanoves F. 2002. A Multiple Comparisons Method based on the distribution of the root node distance of a binary tree obtained by average linkage of the matrix of Euclidean distances between treatment means. JABES 7(2):129-142.
- Dobie J. 1966. Log taper related to lumber production. B.C. Lumberman 48(5):80-85.
- Fahey T. D. and Sachet J. K. 1993. Lumber recovery of ponderosa pine in Arizona and New Mexico. USDA Forest Service Paper PNW-RP-467. Portland, Oregon, US, Pacific Northwest Research Station. 18 pp.
- Fassola H., Crechi E., Videla D. y Keller A. 2010. Estudio preliminar del rendimiento del aserrado de rollizos de rodales de *Pinus taeda* L. con distintos regímenes silvícolas. Yvyrareta 17:20-27.
- Fassola H., Fahler J., Ferrere P., Alegranza D. y Bernio J. 2002. Determinación del cilindro con defectos en rollizos podados de *Pinus taeda* L. y su relación con el rendimiento en madera libre de nudos. Revista de Investigaciones Agropecuarias 31(1):121-137.
- Fassola H. E., Videla D., Keller A. E., Crechi E. H., Winck R. A., Barth S. R. y De Coulon E. 2012. Rendimiento y valor bruto en el aserrado de árboles *Pinus taeda* L. bajo manejo silvopastoril: estudio de caso. Actas 15^{as}. Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales - UNaM / EEA Montecarlo - INTA. - Eldorado, Misiones, Argentina. 8 pp.
- Hernández M., Zaderenko C. y Monteoliva S. 2014. Efecto de las tensiones de crecimiento en el rendimiento y calidad del aserrado de *Eucalyptus dunnii*. Maderas. Ciencia y tecnología 16(4): 403 – 412.
- Mäkelä A., Grace J. C., Deckmyn G., Kantola A. and Campioli M. 2010. Simulating wood quality in forest management models. Forest Systems 19(SI): 48-68.
- Martinez Pastur, G; J. M. Cellini; R. Vukasovic. 2004. Aplicación de sistemas de regeneración con retención dispersa y agregada en bosques de *Nothofagus pumilio* de Tierra del Fuego. Aplicación a gran escala en un aserradero mediano. Módulo Lengua. Subproyecto Aserradero. PIARFON BAP. 26 pp.
- Murara Junior M. I. 2005. Desdobro de toras de *Pinus* utilizando diagramas de corte para classes diamétricas. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Brasil. 67 pp.
- Murara Junior M. I., Pereira Da Rocha M. e Timofeiczuk-Junior R. 2005. Rendimiento em madeira serrada de *Pinus taeda* para duas metodologias de desdobro. Floresta, 35(3):473-483.

- Naselli I. y Leibas L. 2008. Informe Industrial. Industria maderera y sector muebles. FAIMA-INTI. Editorial Melipal. N° 215. Publicado en internet, disponible en http://www.informeindustrial.com.ar/verNota.aspx?nota=Industria%20maderera%20y%20sector%20muebles___90. Acceso Julio 2015.
- NHLA. 2002. The illustrated guide to American Hardwood lumber grades. National Hardwood Lumber Association. United States. 24 pp.
- Olandoski D. P., Brand M. A. e Gorniak E. 1997. Avaliação do rendimento, quantidade, qualidade e aproveitamento de resíduos no desdobro de *Pinus* spp. 5° EVINCI - Evento de Iniciação Científica da UFPR. Curitiba. Brasil. P. 379.
- Rocha M. P. 2000. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias. Tese Doutorado em Engenharia Florestal. Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Brasil. 185 pp.
- SPE-MEFPN (Secretaría de Política Económica del Ministerio de Economía y Finanzas Públicas de la Nación). 2010. Plan de Competitividad Conglomerado Muebles de Madera de la provincia de Misiones. Programa de Competitividad del Norte Grande, préstamo BID 2005 OC/AR. 2010. Argentina. 43 pp.
- Steele P. H. 1984. Factors determining lumber recovery in sawmilling. Gen. Tech. Rep. FPL-39. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 8 pp.
- Valério Á. F., Watzlawick L. F., Dos Santos R. T., Brandelero C. e Koehler H. S. 2007. Quantificação de resíduos e rendimento no desdobro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze. Floresta, 37(3): 387-398.
- Vignote P. S. y Martínez R. I. 2005. Tecnología de la madera. Tercera edición. España. Ediciones Mundi-Prensa. 687 pp.
- Vital B. R. 2008. Planejamento e Operações de Serrarias. Viçosa: UFV, Brasil. 211 pp.
- Winck R. A., Fassola H. E., Videla D., Suirezs T. M., Area M. C. y Pezzutti R. V. 2015. Calidad de madera de *Pinus taeda* de 20 años de edad proveniente de rodales con diferente manejo silvícola. Acta 3° Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles - VIII Congreso Internacional de Sistemas Agroforestales. Iguazú. Misiones. Argentina. Pp 372 – 376.

DISCUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos comprueban que el espaciamiento determina el desarrollo de una masa forestal y algunas de las alteraciones en su compartimentalización de biomasa, sus parámetros dendrométricos y las propiedades físico-mecánicas de la madera. Al momento de definir como ordenadores forestales la densidad de plantación se debe propiciar el espacio suficiente para un buen crecimiento de los árboles y un adecuado aprovechamiento del sitio forestal. El espaciamiento óptimo será aquel capaz de producir el mayor volumen de producto en tamaño, forma y calidad deseables.

Algunos autores afirman que la densidad de plantación influye en las características de crecimiento y sobrevivencia de la masa forestal (Berger, 2000). Estas influencias son dependientes de cada especie, pudiendo ser positivas o negativas según la densidad de plantación. Menor número de árboles por hectárea tiende a producir mayores diámetros y mayor volumen individual y un mayor número de árboles por hectárea da lugar a menores diámetros pero mayores volúmenes por hectárea (Pauleski, 2010; Berger *et al*, 2002).

En el presente estudio se evidenció que con un 95 % de probabilidad la densidad de plantación estuvo correlacionada con el dap, la relación albura/duramen, la contracción y el hinchamiento volumétricos, la longitud de fibra, el módulo de elasticidad y el módulo de rotura. Con un 90 % de probabilidad la densidad de plantación se halló correlacionado con la biomasa total por hectárea, el área basal por hectárea, el volumen con corteza por hectárea y la densidad básica de la madera (Anexo I).

Se comprueba la hipótesis de que la densidad de plantación afecta la acumulación de biomasa.

Los espaciamientos influyen directamente la cantidad de biomasa del sotobosque y de los compartimentos aéreos del árbol. En los tratamientos de mayor densidad de plantación la acumulación de necromasa forestal fue mayor a la de los de menor densidad de plantación. Esto se debe a una mayor deposición de hojas y ramas muertas sobre el suelo. Este comportamiento fue mencionado también en *Eucalyptus* por Oliveira (2005) y Gómes *et al*. (2011). A espaciamientos menores se da una mayor acumulación de biomasa

proveniente del estrato arbustivo, siendo para mayores espaciamientos mayor la acumulación de biomasa del estrato herbáceo.

En consonancia con lo expresado por Mäkela, (1997) y Neilsen y Gerrand (1999), en *Grevillea robusta*, el espaciamiento influye en la distribución de biomasa en los distintos compartimentos del árbol. A mayor número de individuos por hectárea se da una mayor presencia de ramas de menor diámetro y ramas secas, en cambio, a un menor número de arboles por hectárea se da una mayor presencia de ramas de mayor diámetro. La biomasa foliar fue mayor a menores densidades de plantación, lo que al permitir una mayor fotosíntesis hace que en esos tratamientos el crecimiento diamétrico y en volumen individual sea mayor. Estudiando *Eucalyptus camaldulensis*, Müller *et al.* (2005) y Leles *et al.* (2011) afirman que esto se debe además a una mayor disponibilidad de espacio para un mayor incremento de copa. Según Schumacher *et al.* (2011) a medida que aumenta la densidad de plantación, aumenta la biomasa total por unidad de área disminuyendo la biomasa total individual. En *Grevillea robusta*, se da una mayor acumulación de biomasa total a una densidad de 1500 a/ha, disminuyendo esta en un 6, un 40 y un 60 % a densidades de 750, 375 y 162 a/ha, respectivamente.

La altura dominante no está influenciada por la densidad de plantación, salvo en la densidad de 162 a/ha en donde la altura fue menor. Esto se debe a que no existe estado de competencia entre individuos. Si bien la altura dominante es considerada independiente de la densidad de plantación y por ende es considerada como un parámetro útil para inferir sobre calidad de sitio, esto ocurre dentro de cierto rango considerado normal en lo referente a densidad de plantación. Si bien la menor densidad de plantación de este ensayo se halla fuera de ese rango, de todas maneras no contradujo el postulado (Reismann, 1983). Si se analiza altura media, en *Grevillea robusta* la densidad de plantación está relacionada a variaciones en altura. A mayor densidad de plantación se da la mayor altura, con la excepción del tratamiento de 750 a/ha que tiene una explicación particular. Este tratamiento puede considerarse como el tratamiento que mejor aprovecha la relación recursos disponibles (suelo, luz, agua, espacio) dando lugar a un desarrollo diferencial en casi todos los aspectos. Al observar las curvas representativas de crecimiento en altura, es posible notar que la diferenciación entre tratamientos comienza a producirse al darse el inicio de la competencia entre individuos. Esto hace que las mayores densidades de plantación (1500 y 750 a/ha) alcancen una altura mayor en busca de luminosidad, máxime

considerando que la especie es catalogada como heliófita. Balloni (1980), evaluando *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna* a diferentes espaciamientos observa una tendencia a disminuir la altura media de los árboles con una reducción del espaciamiento. Este efecto de la densidad de plantación sobre la altura es observado además por Scolforo (1998) y Leite *et al.* (2006). No obstante, Oliveira Neto *et al.* (2010) coinciden con lo hallado en *Grevillea robusta*, el incremento en altura es poco influenciado por el espaciamiento, siendo este incremento más asociado a la calidad de sitio y la edad de evaluación.

Santos (2011) en un estudio sobre los efectos del espaciamiento en la biomasa de un clon híbrido de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* y Küster Da Silva (2015) en *Eucalyptus benthamii*, constatan que a espaciamientos mayores los individuos adquieren dimensiones más apropiadas para la industria del aserrío y de muebles en un menor período de tiempo, ya que los árboles presentan un mayor volumen individual. En plantaciones con menores espaciamientos se da una mayor producción volumétrica por hectárea en tiempos menores, acompañado de un menor tamaño individual en diámetro. En *Grevillea robusta* a menores densidades de plantación se da un mayor dap, variable que según Radonski y Ribaski (2010) es la mejor expresión del estado de competencia en el crecimiento. Analizando el desarrollo diamétrico a través de la distribución de probabilidades de Weibull, considerando como valor de referencia 1500 a/ha, a 375 a /ha se duplica la posibilidad de tener individuos con diámetros mayores a 30 cm, casi triplicándose dicha probabilidad a 162 a/ha.

Costas *et al.* (2005) y Leite *et al.* (2006) en *Pinus taeda* verificaron que a menor espaciamiento se da una mayor área basal por hectárea. Este hecho fue confirmado por Pinkard y Neilsen (2003) en *Eucalyptus nitens*. En *Grevillea robusta* el área basal decrece con la disminución de la densidad de plantación. Los resultados obtenidos concuerdan con lo expresado por Schneider (2006) quien hace referencia a que el diámetro y el área basal son parámetros afectados por la densidad de plantación.

En cuanto a producción volumétrica, *Grevillea robusta* presenta mayor volumen individual a menores densidades de plantación. Si en cambio se considera volumen a nivel de rodal, a mayores densidades de plantación se dan los mayores volúmenes. Esto coincide con lo expuesto por investigadores para distintas especies. Berger *et al.* (2002) encontró

que los mayores volúmenes comerciales individuales para *Eucalyptus saligna* corresponden a los mayores espaciamientos, independientemente de la edad de evaluación. Silva (2005) observó que en *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* el volumen se duplicó a un espaciamiento mayor (15 m²/planta) si lo compara con un espaciamiento menor (6 m²/planta). Magalhães *et al.* (2006) confirman esta tendencia evaluando el efecto del espaciamiento en cuatro especies de *Eucalyptus*. Reiner *et al.* (2011) concluyen que a medida que aumenta la densidad de plantación aumenta la producción en volumen leñoso y no siempre de uso industrial. Resultados semejantes obtuvieron Sanquetta *et al.* (2003), donde un aumento del espaciamiento da una menor producción volumétrica individual pero permitiendo de este modo la obtención de madera con mayores posibilidades de uso y un precio diferencial.

De manera general los resultados de este estudio son una herramienta útil para el manejo forestal. Cuando el silvicultor procura individuos de mayor diámetro, con un mayor volumen individual, debe adoptar una menor densidad de plantación. Si lo que busca es priorizar la producción en volumen por hectárea debe aumentar la densidad de plantación. Si no tiene definido el uso, puede optar por un punto intermedio entre ambos. Esto es posible ya que diversos autores hablan de que en turnos más largos la producción de la menor densidad de plantación equipararía a la de las mayores densidades en turnos más cortos (Müller *et al.*, 2005).

Al estar el área basal y el volumen con corteza influenciados por parámetros de crecimiento relacionados con el número de individuos, su producción se puede estimar a través de un modelo matemático, utilizando esos parámetros como variables predictoras.

Analizando las propiedades físico-mecánicas, la bibliografía disponible referencia para *Grevillea robusta* una densidad básica de 0,487 g/cm³ (Zárate Morales *et al.*, 2001) y 0,44 g/cm³ de peso específico aparente básico según Pereyra *et al.* (2006). Estos valores son cercanos a los hallados en el presente estudio donde la densidad básica en la mayor densidad de plantación es de 0,51 g/cm³, reduciéndose en las demás densidades (750, 375 y 162 a/ha), que arrojan un valor medio de 0,48 g/cm³. La inexistencia de influencia de la densidad de plantación en la densidad básica de la madera de *Grevillea robusta*, con excepción a la de mayor competencia entre individuos, coincide con la afirmación de Vital (1987) que no verifica efecto significativo del espaciamiento de plantación con el peso

específico básico de la madera. Garcia *et al.* (1991) halla una disminución del peso específico básico de la madera con el aumento del espaciamiento, es decir, una menor densidad de plantación. Diversos autores sostienen que cuanto mayor es el crecimiento en diámetro, menor es la densidad básica de la madera, pero esta no es una regla general para los eucaliptus (Souza *et al.*, 1986). El espaciamiento de plantación tiene una serie de implicancias desde una óptica silvicultural y tecnológica ya que afecta, como se comprobó en *Grevillea robusta*, la tasa de crecimiento y la calidad de la madera (Eloy *et al.*, 2013; Eloy *et al.*, 2014). El conocimiento de los factores que impactan sobre la densidad básica de la madera, así como su incidencia en el producto final no son concluyentes y depende de cada especie en particular. En *Grevillea robusta* la longitud de fibra, así como la contracción y el hinchamiento siguieron la misma tendencia que la densidad básica de la madera, en razón de estar íntimamente relacionadas con ella. La dureza Janka es afectada por la densidad de plantación, siendo mayor en las dos densidades de plantación superiores y menor en las dos inferiores. Los valores hallados son similares a los referidos por Zarate Morales *et al.* (2001), quienes presentaron valores de 358 kg/cm² en los extremos de la probeta y 378 kg/cm² en los laterales de las mismas.

Considerando que el módulo de elasticidad (MOE) es una propiedad mecánica importante para determinar la aptitud de una madera para uso estructural, ya que está relacionado a la rigidez del material (Walford, 1985), se evaluó también la incidencia de la densidad de plantación sobre el MOE. El tratamiento de mayor número de individuos por hectárea presentó un valor 17% superior al resto. Un mayor módulo de elasticidad indica una mejor calidad de la madera para fines estructurales. Los valores hallados en las menores densidades de plantación se encuentran en el rango considerado por la norma JAS como apto para uso con fines estructurales (O'Neill, 2004). Según este autor, dicha norma establece que todos aquellos elementos de madera que superen la categoría E 70, o sea un valor de MOE superior a 7,85 GPa, son aptos para el uso estructural en la construcción. En *Pinus radiata*, (Grabianovski *et al.*, 2004), tampoco hallaron diferencias de MOE_d evaluando densidades de plantación entre 100 y 625 a/ha. Los valores máximos hallados son similares a los valores medios citados en *Eucalyptus grandis* por O'Neill (2004). A su vez, los valores mínimos hallados en los tratamientos de menor densidad de plantación, son similares a los mencionados por el citado autor para *Pinus taeda*. El módulo de rotura

(MOR) presenta una tendencia similar al módulo de elasticidad, diferenciándose la mayor densidad de plantación con los demás tratamientos con un valor 18 % superior.

Varios autores han determinado, al igual que los resultados de este estudio, que existe una correlación positiva entre el MOE_d (módulo de elasticidad dinámico) y el MOE_e (módulo de elasticidad estático). Esto permite el uso de métodos de evaluación no destructivos como herramienta al momento de decidir el manejo silvícola de la plantación forestal optimizando su producción (Tsehaye *et al.*, 2000, Wang *et al.*, 2000, Lindström *et al.*, 2002).

Los resultados obtenidos en rendimiento de aserrado no muestran diferencia de rendimiento porcentual general del individuo en función de la densidad de plantación. Si el análisis se efectúa por troza, la primera troza tiene un mayor rendimiento porcentual de aserrado a menores densidades de plantación, ocurriendo lo contrario en la segunda troza debido a su menor conicidad. Esto coincide con Larson (1969) que observó que a menores espaciamientos mejora la forma del fuste, desde el punto de vista del aprovechamiento productivo. Este comportamiento pudo deberse a una adaptación biológica de los individuos a fin de soportar mayores alturas, dando lugar a un mayor diámetro en base de copa, lo que hace disminuir su ahusamiento. De acuerdo con Ponce (1984), citado por Chies (2005), el rendimiento en madera aserrado está fuertemente afectado por una acentuación del ahusamiento. Esta tendencia es contraria a la referenciada para *Pinus taeda* (Chies, 2005).

Tipificada la madera aserrada según grado de calidad, una mayor densidad de plantación da lugar a un mayor volumen de madera de la mejor calidad, no obstante este hecho debe ponderarse con las dimensiones obtenidas. Las dimensiones predominantes en esas densidades de plantación son menores a las requeridas por la industria del aserrío y del mueble.

Por todo lo hasta aquí expuesto, la elección de la densidad de plantación debe realizarse, entre otros aspectos, tomando en cuenta el producto final requerido por el mercado, ya sea este para la industria del aserrío o del mueble.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Balloni E. A. e Simões J. V. 1980. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. Sere técnica nº3. IPEF. Brasil. 16 pp.
- Berger R. 2000. Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. Dissertação Mestrado em Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. Brasil. 126 pp.
- Berger R., Schneider P. R., Finger C. A. G. e Haselein C. R. 2002. Efeito do espaçamento e da adubação no Crescimento de um Clone de *Eucalyptus saligna* Smith. Ciência Florestal. 12 (2):75 – 87.
- Chies D. 2005. Influência do Espaçamento Sobre a Qualidade e o Rendimento da Madeira Serrada de *Pinus taeda* L. Tese Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Brasil. 137 pp.
- Costas R., Mc Donagh P., Weber E., Figueredo S. y Irschick P. 2005. Influencias de la densidad y podas sobre la producción de *Pinus taeda* L. a los 7 años de edad. Ciência Florestal. 15 (3):275-284.
- Eloy E. , Caron B. O., Trevisan R., Behling A., Souza V.Q. e Schmidt, D. 2013. Variação axial e efeito do espaçamento na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mearnsii*. Ciência da Madeira 4(2):215-227.
- Eloy E., Caron B. O., Silva D. A., Schmidt D., Trevisan R., Behling A. e Elli E. F. 2014. Influência do espaçamento nas características energéticas de espécies arbóreas em plantios de curta rotação. Revista Árvore 38: 551-559.
- Garcia C. H., Corradine L. e Alvarenga S. F. 1991. Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos. IPEF. Circular técnica 179. 8 pp.
- Gomes M. V., Bumbieris I. M., Matos F. A., Cremon T., Yoshiy M. L., Daniel O. e Carvalho R. P. 2011. Produção de serrapilheira e teor de magnésio no solo de um sistema silvipastoril sob diferentes espaçamentos de eucalipto. Encontro de Ensino, Pesquisa e Extensão/UFGD. Resumos expandidos e trabalhos completos. Dourados. Brasil. 5 pp.
- Grabianowski M., Manley B. and Walker J. 2004. Impact of stoking and exposure on outer wood acoustic properties of *Pinus radiata* in Eyrewell Forest. New Zealand Journal of Forestry 49 (2): 13-17.
- Küster Da Silva, S. V. 2015. Produção de biomassa e quantificação de nutrientes em *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage sob diferentes densidades de plantio. Dissertação de mestrado Universidade Estadual do Centro-Oeste. Brasil. 89 p.

- Larson P. R. 1969. Wood formation and the concept of the wood quality. Bull. New York, Yale University. 79:54.
- Leite H. G., Gama J. R. V., Cruz J. P. e Souza A. L. 2006. Função de afilamento para *Virola surinamensis* (Roll.) WARB. Revista Árvore. 30 (1):99-106.
- Leles P. S., Abaurre G. W., Alonso J. M., Nascimento D. F. e Lisboa A. C. 2011. Crescimento de espécies arbóreas sob diferentes espaçamentos em plantio de recomposição florestal. Scientia Forestalis 39: 231-239.
- Lindström H., Harris P. and Nakada R. 2002. Methods for measuring stiffness of Young trees. Holz als Roh-und Werksto.60: 165-174.
- Magalhães W. M., Macedo R. L. G., Venturim N., Higashikawa E. M. e Yoshitani Júnior M. 2006. Desempenho silvicultural de espécies de *Eucalyptus* spp. em quatro espaçamentos de plantio na região noroeste de Minas Gerais. Floresta e Ambiente. 12 (1):1-7.
- Mäkela A. 1997. A Carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. Forest Science 43:7-23.
- Müller M. D., Couto L., Leite H. G., e Brito J. O. 2005. Avaliação de um clone de eucalipto estabelecido em diferentes densidades de plantio para produção de biomassa e energia. Biomassa & Energia 2: 177-186.
- Neilsen W. A. and Gerrand A. M. 1999. Growth and branching habit of *Eucalyptus nitens* at different spacings and the effect on final crop selection. Forest Ecology and management. 123: 217–229.
- O'Neill H. 2004. Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos. Nota técnica. Laboratorio Tecnológico del Uruguay, Montevideo. Uruguay. 9 pp.
- Oliveira T. K. 2005. Sistema agrossilvipastoril com eucalipto e braquiária sob diferentes arranjos estruturais em área de cerrado. Tese Doutorado em Florestas de Produção Universidade Federal de Lavras. Lavras. Brasil. 150 pp.
- Oliveira Neto S. N., Reis G. G., Reis M. G. F., Leite H. G. e Neves J. C. L. 2010. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. Floresta. 4. (4):755-762.
- Pauleski D. T. 2010. Influência do espaçamento sobre o crescimento e a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. Tese Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. Brasil. 198 pp.
- Pereyra O., Suirezs T. M., Pitsch C. y Báez R. 2006. Estudio de las propiedades físico-mecánicas y comportamiento en procesos industriales de la madera de Kiri, Grevillea, Paraíso y Toona. Revista Floresta, Curitiba, Paraná. Brasil. 36 (2): 213-223.

- Pinkard E. A. and Neilsen W. A. 2003. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: implications for thinning. *Forest Ecology and Management* 172:215-227.
- Ponce R. M. 1984. Produção de madeira de qualidade para processamento mecânico. *Silvicultura*. São Paulo. 9 (34):9-13.
- Radonski M. I. e Ribaski J. 2010. Excentricidade da medula em *Grevillea robusta* e *Corymbia citriodora* cultivados em sistema silvipastoril. Colombo: Embrapa Florestas. Embrapa Florestas. Comunicado técnico n° 248. 6 pp.
- Reiner D. A., Silveira E. R. e Szabo M. S. 2011. O uso do eucalipto em diferentes espaçamentos como alternativa de renda e suprimento da pequena propriedade na região sudoeste do Paraná. *Synergismus scyentifica*. 6 (1): 10 – 18.
- Reismann C. B. 1983. Clasificação de sitio para *Araucaria angustifolia*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* no segundo planalto de Estado de Paraná. Projeto: Fundação da UFPR para o desenvolvimento da Ciencia, da tecnologia e da Cultura. Curitiba. Brasil. 286 pp.
- Sanquetta C.R, Mora A. L., Borsato R, Vidal M. A. S., Peixoto A. M. M. e Chiaranda R. 2003. Efeito do espaçamento de plantio em reflorestamentos de *Pinus taeda* L. em Jaguariaíva-PR. *Acadêmica* 1(1): 55-61.
- Santos M. D. 2011. Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Dissertação Mestrado em Ciência Florestal. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, São Paulo. Brasil. 140 pp.
- Schneider P. R. 2006. Introdução ao manejo florestal. Santa Maria: FACOS-UFSM. Brasil. 64 pp.
- Schumacher M. V., Witschoreck R. e Calil F. N. 2011. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. *Ciência Florestal* 21: 17-22.
- Scolforo J. R. S. 1998. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. Lavras: UFLA/FAEPE. 453 pp.
- Silva C. R. 2005. Efeito do espaçamento e arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de *Eucalyptus* na região nordeste do Estado de São Paulo. Dissertação Mestrado em Recursos Florestais. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. São Paulo. Brasil. 50 pp.
- Souza V. R., Carpim M. A. e Barrichelo L. E. G. 1986. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetro e posição em árvores de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. *IPEF* 3:63-72.
- Tsehaye A., Buchanan A. H. and Walker J. 2000. Sorting of logs using acoustics. *Wood Science and Technology* 34(4): 337-344.

- Vital B. R. e Della Lucia R. M. 1987. Efeito do espaçamento na produção em peso e na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* aos 52 meses de idade. Revista Árvore. 11 (2):132-145.
- Walford G. 1985. The mechanical Properties of New Zealand-grown Radiata Pine for Export to Australia. FRI Bulletin N° 93. Forest Research Institute, New Zealand Forest Service. 27 pp.
- Wang X., Ross R., Mc Clellan M., Barbour R., Erickson J., Forsman, J. and Mc Ginnis G. 2000. Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-RP-585. 9 pp.
- Zárate Morales R. P., Ordóñez Candelaria V. R. y Martínez Castillo J. L. 2001. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de *Grevillea robusta* A. Cunn. del estado de Veracruz. Revista Madera y Bosques 7(1):57-69.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES GENERALES

Comprobándose las hipótesis inicialmente planteadas y en base a los resultados obtenidos se puede concluir que el espaciamiento entre árboles tiene efectos en el tipo de producto a obtener en cuanto a las dimensiones y a la calidad de la madera de *Grevillea robusta*, así como también en los distintos estratos del sistema forestal generados a partir de la implantación del componente arbóreo (sotobosque y estrato arbóreo).

Analizando la biomasa del sistema, en cuanto al estrato inferior, la densidad de plantación influye en la composición del sotobosque, la biomasa arbustiva predomina en las mayores densidades de plantación mientras que en la menor densidad de plantación toma preponderancia la biomasa herbácea. En el estrato arbóreo, la producción en volumen y biomasa seca del tronco guarda relación directa con la densidad de plantación. A mayor número de individuos por hectárea, mayor es el volumen y la cantidad de materia seca por unidad de área. En términos relativos, la biomasa de copa (ramas, hojas) corresponde a un 20 a 30 % de la biomasa total, en los menores y mayores espaciamientos, respectivamente. La biomasa de fuste representa entre el 65 y el 73 %, en forma decreciente de mayor a menor densidad de plantación.

La información generada a través de los modelos aditivos de predicción de la biomasa de los distintos compartimentos de *Grevillea robusta* es de utilidad para la descripción cuantitativa de la masa arbórea, permitiría determinar tanto la producción de biomasa obtenible como el contenido de Carbono del sistema, conocimiento de mucho valor en el actual contexto de cambio climático. Al tomar en cuenta la aditividad de las funciones de biomasa, los modelos empleados constituyen un paso superador a los modelos alométricos utilizados generalmente para dicha estimación.

Considerando la arquitectura del componente arbóreo, las menores densidades de plantación tienen ramas de mayor diámetro, dejando defectos de mayor dimensión en la madera aserrada de las trozas superiores sin poda.

En cuanto a la caracterización dendrométrica del estrato arbóreo, a menores densidades de plantación se genera una menor competencia por recursos (nutrientes, agua y luz), lo que resulta en un mayor desarrollo individual en diámetro y un menor incremento en altura, aunque en este último parámetro la influencia es escasa. En este aspecto, la distribución diamétrica afecta al rendimiento y la calidad de la madera obtenida. En *Grevillea robusta*, a menores densidades de plantación, hay un mayor rendimiento porcentual de aserrío en la primera troza, pero esto se revierte en la segunda troza debido a la variación existente en ahusamiento. En la mayor densidad de plantación se obtiene un mayor rendimiento porcentual de aserrío de la segunda troza dado que la conicidad es menor. Si se analiza dicho rendimiento a nivel de árbol, sin diferenciar trozas basales o superiores, no hay influencia de la densidad de plantación en el rendimiento porcentual de aserrío.

Comparando la calidad de madera a obtener según la clasificación por grado de apariencia, a nivel individual, los rendimientos de madera de calidades superiores presentan una tendencia creciente en favor de las menores densidades de plantación. Sin embargo esta tendencia no se mantiene a nivel de rodal. Si bien a nivel de rodal la mayor producción en volumen y área basal se da en las mayores densidades de plantación, se trata de productos de menores dimensiones, lo que reduce su empleo multipropósito. Aunque una parte considerable de esa producción pertenece a madera de la calidad superior, sus dimensiones no siempre cumplen los requerimientos de la industria del aserrío y el mueble. Únicamente las densidades de 375 y 162 árboles por hectárea permiten la obtención de tablas de un ancho mayor a 185 mm.

Respecto a las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Grevillea robusta*, la densidad básica media de la madera no es afectada por la densidad de plantación, con la excepción del tratamiento de 1500 a/ha, donde se evidencia una marcada competencia entre individuos y un aumento de la densidad básica (7 %). Esta competencia se evidencia a través de una elevada mortalidad. Idéntico comportamiento presenta la estabilidad dimensional. Asimismo ese tratamiento presenta una mayor longitud de fibras (4 %). La dureza Janka es mayor en las dos densidades de plantación superiores, disminuyendo en las menores densidades de plantación (9 %). Al estar íntimamente ligada la densidad básica de la madera con las propiedades mecánicas de la misma, la densidad de plantación no alteró

significativamente los módulos de elasticidad y rotura en el rango de 162 a 750 a/ha a edad de corta de 18 años.

Al ser las propiedades tecnológicas de la madera de *Grevillea robusta* similares dentro del rango de espaciamientos empleados usualmente por los forestadores de la zona hasta turno final, el silvicultor podrá optar por una amplia gama de densidades de plantación sin afectar la calidad de la madera. Esto brinda la posibilidad de implementar tanto un sistema netamente forestal como uno agrosilvopastoril combinando la actividad forestal con cultivos agrícolas y ganaderos. La integración de las tres actividades evidencia sinergias económicas, sociales y ambientales. Entre las ventajas que este abanico de posibilidades ofrece al productor es importante destacar el hecho de que, incorporar a la actividad agrícola una cubierta de árboles, brinda un ambiente más estable protegiendo el suelo y promoviendo un mayor reciclaje de nutrientes. El cultivo de *Grevillea robusta* asociado a actividades agrícolas tradicionales como ganadería, yerba mate, té y otras, brinda al productor la posibilidad de incrementar sus ingresos diversificando su producción al incorporar a la madera de calidad.

ANEXO I. CORRELACIONES ENTRE PARÁMETROS EVALUADOS

p-valores																				
Coeficientes de correlación	Parámetros evaluados	a/ha	Bt/ha	dap	G	V c c/ ha	PD	db	CV	HV	CA	LF	DF	LV	DV	MOE	MOR	R	Ahus	MC %
	a/ha		0,131	0,019	0,119	0,162	0,037	0,089	0,023	0,022	0,823	0,014	0,870	0,459	0,203	0,009	0,005	0,696	0,297	0,686
	Bt/ha	0,869		0,059	0,006	0,018	0,287	0,410	0,216	0,218	0,405	0,219	0,820	0,305	0,021	0,138	0,149	0,795	0,741	0,258
	dap	-0,981	-0,941		0,061	0,100	0,093	0,175	0,053	0,054	0,634	0,056	0,960	0,442	0,128	0,038	0,037	0,867	0,436	0,525
	G	0,881	0,994	-0,939		0,006	0,277	0,393	0,218	0,218	0,477	0,209	0,926	0,239	0,013	0,112	0,125	0,822	0,713	0,281
	Vcc/ha	0,838	0,982	-0,900	0,995		0,339	0,459	0,281	0,280	0,470	0,266	0,952	0,182	0,003	0,144	0,162	0,753	0,785	0,241
	PD	-0,964	-0,713	0,907	-0,723	-0,661		0,014	0,010	0,009	0,985	0,005	0,800	0,659	0,393	0,058	0,044	0,462	0,141	0,940
	db	0,911	0,590	-0,825	0,607	0,541	-0,986		0,046	0,043	0,826	0,035	0,695	0,742	0,522	0,108	0,091	0,331	0,068	0,896
	CV	0,977	0,784	-0,947	0,782	0,719	-0,990	0,955		0,000	0,873	0,006	0,931	0,652	0,327	0,055	0,042	0,566	0,213	0,826
	HV	0,978	0,782	-0,946	0,782	0,720	-0,991	0,958	1,000		0,885	0,004	0,915	0,644	0,327	0,052	0,039	0,560	0,208	0,831
	CA	-0,177	-0,595	0,366	-0,524	-0,530	-0,015	0,174	-0,127	-0,115		0,934	0,165	0,792	0,416	0,878	0,889	0,238	0,509	0,118
	LF	0,986	0,781	-0,944	0,791	0,734	-0,995	0,965	0,995	0,996	-0,066		0,835	0,585	0,315	0,032	0,022	0,550	0,195	0,839
	DF	0,130	-0,180	0,040	-0,074	-0,048	-0,200	0,305	0,069	0,085	0,835	0,165		0,636	0,901	0,766	0,775	0,458	0,523	0,516
	LV	0,541	0,695	-0,558	0,761	0,818	-0,341	0,258	0,348	0,356	-0,208	0,415	0,364		0,182	0,369	0,403	0,679	0,974	0,366
	DV	-0,797	-0,979	0,872	-0,987	-0,997	0,607	-0,478	-0,673	-0,673	0,584	-0,685	0,100	-0,818		0,186	0,205	0,680	0,858	0,194
	MOE	0,991	0,862	-0,962	0,888	0,856	-0,942	0,892	0,945	0,948	-0,122	0,968	0,234	0,631	-0,815		0,001	0,711	0,311	0,681
	MOR	0,995	0,851	-0,963	0,875	0,838	-0,956	0,910	0,958	0,961	-0,111	0,978	0,225	0,597	-0,795	0,999		0,680	0,287	0,708
	R	-0,304	0,206	0,133	0,178	0,247	0,538	-0,669	-0,434	-0,440	-0,762	-0,451	-0,542	0,321	-0,320	-0,289	-0,320		0,891	-0,809
	Ahus	-0,703	-0,259	0,565	-0,287	-0,216	0,859	-0,932	-0,787	-0,792	-0,491	-0,805	-0,477	-0,026	0,142	-0,689	-0,713	0,891		0,545
	MC %	-0,314	-0,742	0,475	-0,719	-0,759	0,060	0,104	-0,174	-0,170	0,883	-0,161	0,484	-0,634	0,806	-0,319	-0,292	-0,809	-0,455	

Referencias: Bt/ha, biomasa total por hectárea; dap, diámetro a altura de pecho; G, área basal por hectárea; V cc/ha, volumen con corteza por hectárea; PD, proporción de duramen (%); db, densidad básica de la madera; CV, contracción volumétrica; HV, hinchamiento volumétrico; CA, coeficiente de anisotropía; LF, longitud de fibras; DF, diámetro de fibra; LV, longitud de vasos; DV, diámetro de vasos; MOE, módulo de elasticidad; MOR, módulo de rotura, R, rendimiento de aserrado porcentual; Ahus, ahusamiento; MC %, madera libre de defectos (%). Valores en negrita son significativos (P<0,05).