

ARTÍCULOS

Modelación del área foliar a nivel de rama y su distribución vertical en la copa de árboles establecidos en cultivos dendroenergéticos

Modeling leaf area at branch level and its vertical distribution in the crown of trees established as dendroenergy crops

Simón Sandoval^{a*}, Eduardo Acuña^a, Jorge Cancino^a, Rafael Rubilar^b, Edwin Esquivel^c

* Autor de correspondencia: ^a Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Laboratorio de Análisis y Modelamiento de Geoinformación, Concepción, Chile, simonsandoval@udec.cl

^b Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Silvicultura, Cooperativa de Productividad Forestal, Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Concepción, Chile.

^c Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Agronomía, Cartago, Costa Rica.

SUMMARY

Studying the crown shapes of trees using modeling techniques is fundamental to understanding the dynamics of crown closure in high-density plantations and can be used as an indicator of intra-specific competition. This study modeled leaf area at branch level and its vertical distribution in the crowns of different aged *Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus nitens* established at 5,000, 7,500 and 10,000 trees ha⁻¹. The effect of planting density and crop age on model parameters was significant in most cases, suggesting the use of branch-level leaf area models adjusted for each condition. The vertical distribution of leaf area was modeled using the Weibull distribution function. The effect of planting density and crop age on the Weibull function parameters was significant. The vertical distribution of foliar area was highly variable at early ages. However, for the species of the *Eucalyptus* genus it was evident that as the crop grows, the distribution of foliage along the crown tended to be concentrated in the upper part of the trees. On the other hand, higher planting density tended to be correlated with more platykurtic distribution due to the higher level of intraspecific competition.

Keywords: fast-growing species, Weibull cumulative distribution function, leaf area index, biomass and bioenergy.

RESUMEN

Estudiar la forma de la copa de los árboles utilizando técnicas de modelación es fundamental para conocer la dinámica del cierre de copas en altas densidades de plantación y puede ser usado como un indicador de la competencia intraespecífica del cultivo. Este estudio modeló el área foliar a nivel de rama y su distribución vertical en la copa a diferentes edades de *Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis* y *Eucalyptus nitens* establecidas a 5.000, 7.500 y 10.000 árboles ha⁻¹. El efecto de la densidad de plantación y la edad del cultivo sobre los parámetros del modelo fue significativo en la mayoría de los casos, sugiriendo el uso de modelos de área foliar a nivel de rama ajustados para cada condición. La distribución vertical del área foliar fue modelada mediante la función de distribución Weibull. El efecto de la densidad de plantación y la edad de cultivo sobre los parámetros la función Weibull fue significativo. La distribución vertical del área foliar fue altamente variable a edades tempranas, sin embargo, en las especies del género *Eucalyptus* fue evidente que a medida que el cultivo crece, la distribución del follaje a lo largo de la copa propendió a concentrarse en la parte más alta de los árboles. Por su parte, a mayor densidad de plantación, la distribución tendió a ser más platycúrtica producto del mayor nivel de competencia intraespecífica.

Palabras clave: especies de rápido crecimiento, función de distribución acumulada Weibull, índice de área foliar, biomasa y bioenergía.

INTRODUCCIÓN

La disminución de los combustibles fósiles junto al constante incremento de la población a nivel mundial ha orientado el interés en la búsqueda de nuevas fuentes de

energía renovable. La materia prima de origen forestal (e.g. leña, carbón de madera y residuos de cosecha) surgen como una fuente proveedora de biocombustibles, mitigando sustancialmente la presión sobre los combustibles de origen fósil.

En Chile, recientemente se ha comenzado a estudiar los beneficios económicos, sociales y medioambientales de cultivos dendroenergéticos establecidos a nivel experimental (Acuña *et al.* 2018a). Estos cultivos involucran el uso de especies forestales de rápido crecimiento establecidas en altas densidades de plantación para maximizar la acumulación de biomasa y minimizar el periodo de rotación (Resquin *et al.* 2020). Comúnmente estos cultivos se han establecido en suelos degradados y marginales, por lo cual han contribuido a la recuperación de estos sitios. Las especies más utilizadas pertenecen a los géneros *Eucalyptus*, *Populus*, *Acacia* y *Salix*, incluyendo también algunas gramíneas (Dahal *et al.* 2022, Rockwood *et al.* 2022); estas se caracterizan por presentar gran capacidad de adaptación y rebrote (Ríos-Saucedo *et al.* 2017). El manejo de la densidad de plantación es un factor crítico que puede condicionar en gran parte el éxito en términos de rendimiento en biomasa en este tipo de cultivos. El espaciamiento depende del vigor de la especie y de las condiciones climáticas. Varios estudios describen amplios rangos de densidades de plantación, que van desde 1.500 a más de 100.000 árboles ha⁻¹ (Resquin *et al.* 2020).

El interés en este tipo de cultivo se hace fundamental poseer herramientas que permitan orientar la toma de decisiones relativas al establecimiento a escala operacional e intervenciones silvícolas en cultivos dendroenergéticos (Morkovina y Keča 2019). En cultivos forestales la toma de decisiones se basa principalmente en el crecimiento y rendimiento de un rodal, variables cuya predicción ha sido motivo de constante estudio por décadas (Parresol 2003). En la actualidad, la predicción del crecimiento y rendimiento de un rodal en particular se realiza mediante modelos matemáticos, en función de variables de estado, tales como el número de árboles por hectárea, área basal y altura dominante (Dong *et al.* 2020).

La predicción del crecimiento y rendimiento de un rodal puede basarse en el área foliar. Esta es una variable que mantiene estrecha relación con el volumen y biomasa aérea, debido a que estas variables dependen en gran medida del estado fisiológico de la planta (Tripathi *et al.* 2018). El follaje es una variable útil para cuantificar la producción potencial en biomasa de los árboles y es una de las variables biológicas más adecuadas para ser incorporada en modelos de crecimiento a nivel de árbol y unidad de superficie. Es por ello que la estimación precisa del área foliar contribuye al conocimiento del comportamiento y características de crecimiento en volumen y biomasa de los árboles.

La determinación del área foliar a nivel de árbol individual se realiza a partir de métodos directos e indirectos, los que a su vez pueden ser destructivos y no destructivos. La elección del método a utilizar depende fundamentalmente de las características del cultivo, tamaño de muestra y de los objetivos de la investigación. Los métodos directos utilizan modelos alométricos, pro-

porcionando estimaciones precisas del área foliar a nivel de rama y árbol individual. A nivel de rama, la determinación del área foliar se realiza en función del diámetro de rama, longitud de rama y posición relativa en la copa (Pretzsch 2019). Estas variables dependen de la morfología de la especie, densidad de plantación, tratamiento silvícola y edad del cultivo. Los métodos directos, por su parte, utilizan medidores de área foliar de alta resolución, pero los instrumentos utilizados en el proceso son más costosos, constituyendo una limitación importante para su realización.

La distribución del área foliar está asociada a muchos aspectos relacionados con la dinámica de las especies y es muy susceptible a cambios en la interceptación de luz y al nivel de competencia intraespecífica, además, depende de factores como la edad del árbol, densidad de la plantación, composición de especies y el tamaño y estructura de la copa (Weiskittel *et al.* 2006). La distribución del follaje ha sido cuantificada y descrita para una gran variedad de especies de coníferas; la descripción en especies latifoliadas ha recibido menos atención (Garber y Maguire 2005). La descripción del comportamiento del follaje a lo largo de la copa se realiza generalmente mediante funciones de probabilidad. La distribución normal fue la primera utilizada para describir el follaje en la copa, desde entonces la distribución Weibull ha sido la función más utilizada en estudios de área foliar, principalmente debido a que su flexibilidad permite describir variadas formas de la distribución de follaje a lo largo de la copa (Garber y Maguire 2005, Weiskittel *et al.* 2009).

La modelación del área foliar a nivel de rama y la distribución vertical del área foliar a nivel de árbol solo han sido estudiadas preferentemente en rodales tradicionales, *i.e.* cultivos destinados a la producción de madera aserrada o pulpable, siendo aún escasos en cultivos forestales de corta rotación para bioenergía. En Chile, este tipo de cultivos ha sido establecido solo a nivel experimental, desconociéndose el potencial para su establecimiento a escala operacional y la estrategia más adecuada para proyectar su crecimiento y rendimiento. El proyecto INNOVA Biobío N° 06-PC-33 fue pionero en lo relativo a la producción de biomasa para bioenergía y generó una base experimental de la silvicultura destinada a ese objetivo. Sin embargo, a la fecha es escasa la información de cuáles son las herramientas necesarias para generar proyección precisas del crecimiento de estos cultivos y la respuesta de los árboles en las altas densidades de plantación del cultivo (Acuña *et al.* 2012). El objetivo de este estudio fue modelar la superficie foliar a nivel de rama y describir su distribución vertical a lo largo de la copa en las especies *Acacia melanoxylon* R.Br., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. y *Eucalyptus nitens* (Deane et Maiden), establecidas en un ensayo dendroenergético en tres densidades de plantación (5.000, 7.500 y 10.000 árboles ha⁻¹), analizado en tres mediciones realizadas a diferente edad en los primeros 36 meses de crecimiento del cultivo.

MÉTODOS

Características del sitio y establecimiento del estudio. El ensayo se estableció en agosto de 2007 en el secano interior de la región de Ñuble, comuna de Ninhue. El sitio presenta limitaciones nutricionales y de agua y se caracteriza predominantemente por plantaciones forestales de bajo rendimiento dedicadas a la producción de celulosa o madera para aserrío. El sitio fue previamente ocupado por una plantación de *Pinus radiata* D. Don de 24 años, tiene una precipitación media anual de 1.324 mm y temperaturas medias anuales mínimas, medias y máximas de 0 °C, 11,3 °C, y 23,5 °C, respectivamente. Los suelos son de la familia de serie de suelos Cauquenes derivadas de rocas graníticas, y se clasifican como Palexeralf Ultic méxico (Alfisol). Los suelos son profundos (> 100 cm), bien drenados y bien evolucionados de texturas arcillosas en todo el perfil (CIREN 1999). El terreno tiene una topografía ondulada a abrupta pero la pendiente en el área de estudio no supera el 5 %.

Antes del inicio de la prueba, el sitio se preparó extra- yendo los tocones del cultivo anterior y se subsoló en un diseño de cuadrícula a 80 cm de profundidad utilizando un tractor Caterpillar D8K con 60 cm de distancia entre filas. Las malezas se controlaron antes y después de la siembra utilizando una mezcla química que contenía 4 kg ha⁻¹ de glifosato (Roundup Max), 1,5 kg ha⁻¹ de simazina y 2,5 kg ha⁻¹ de atrazina. La fertilización post-siembra incluyó 15 g de boronatrocalcita, 75 g de fosfato diamónico y 25 g de sulphomag aplicados en círculo a 25 cm del cuello de cada planta. Se construyó una cerca de 1,2 m de altura enterrada a unos 0,3 m de profundidad para proteger el área de estudio de los animales.

El ensayo se estableció como un diseño de bloques al azar completo con tres repeticiones. Los bloques fueron áreas cuadradas de 75 m en cada lado (5.625 m²) que consistían en nueve unidades experimentales de 25 m por lado (625 m²) con 49 árboles de medición y una zona de amortiguamiento para reducir los efectos de borde (figura 1). Se establecieron tres especies (*A. melanoxylon*, *E. camaldulensis* y *E. nitens*) en cada bloque con tres repoblaciones (5.000, 7.500 y 10.000 árboles ha⁻¹).

Medición de variables y determinación de biomasa. En los árboles localizados en el núcleo de las unidades experimentales se registró el diámetro a la altura de tocón, medido a 0,1 m sobre el nivel del suelo (DAT) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) cuando la altura de los árboles superó 1,3 m, el diámetro de copa, altura de copa viva y altura total. El muestro para la determinación de la biomasa aérea y estructura de copa se realizó en los meses de julio, extrayendo una muestra destructiva de tres árboles proveniente de la zona de amortiguamiento de cada unidad experimental, en total se realizaron nueve mediciones. La selección de esos árboles se realizó después de la medición del núcleo de las unidades experimentales y buscó abarcar toda la distribución diamétrica (DAT) y de altura total. Los

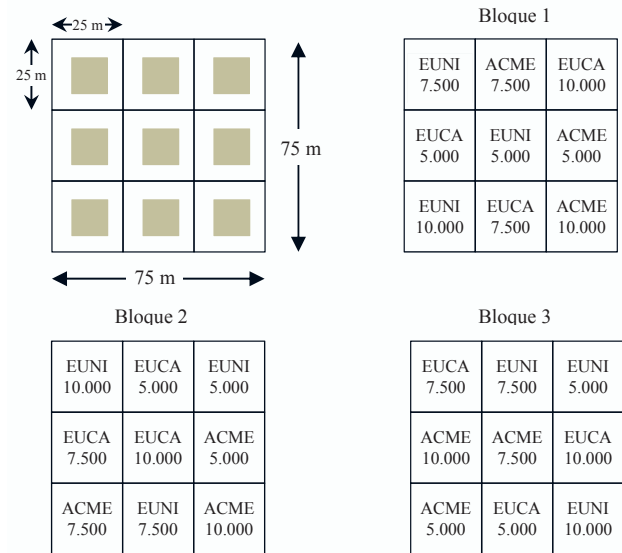


Figura 1. Diseño experimental del estudio. Distribución de especies y densidades en predio Llohué, junto con la disposición de los bloques en terreno. *Eucalyptus nitens* (EUNI), *Eucalyptus camaldulensis* (EUCA) y *Acacia melanoxylon* (ACME).

Experimental design of the study. Distribution of species and densities in the Llohué farm, together with the layout of the blocks on the ground. *Eucalyptus nitens* (EUNI), *Eucalyptus camaldulensis* (EUCA) and *Acacia melanoxylon* (ACME).

árboles seleccionados fueron cortados a 0,1 m sobre el nivel del suelo, transportados y almacenados en frío a 4 °C. La biomasa total seca por árbol se determinó mediante el pesaje de tres componentes, *i.e.* fuste, ramas y follaje; el material fresco fue secado en horno a 65 °C hasta peso seco constante. En esos árboles también se midió el diámetro y longitud de cada rama, longitud efectiva de rama con hojas y la altura de inserción de cada rama en el fuste. En cinco ramas seleccionadas sistemáticamente a lo largo del fuste se contabilizó el número de hojas y el área de las hojas individuales se determinó utilizando un medidor de área foliar LI-COR (Modelo LI-3000, Li-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA).

Modelación del área foliar a nivel de rama. Con la información de superficie foliar total de cada rama muestra se ajustaron tres modelos para cada edad, especie y densidad de plantación. De entre estos tres modelos se identificó el más adecuado para estimar el área foliar y a partir de este se determinó el efecto de la densidad y edad sobre los parámetros del modelo. Para ello se realizaron ajustes promedio por especie, *i.e.* no considerando la edad ni la densidad de plantación.

$$LA = b_1 D b^{b_2} L f e^{b_3} H r b^{b_4} \quad [1]$$

$$\sqrt{LA} = b_1 D b^{b_2} RDINC^{(b_3-1)} \exp \left[- (b_4 RDINC)^{b_3} \right] \quad [2]$$

$$\sqrt{LA} = b_1 D b^{b_2} RDINC^{(b_3-1)} \exp[-RDINC^{b_3}] \quad [3]$$

Donde, LA es el área foliar a nivel de rama (cm^2), Db es el diámetro basal de la rama (cm), Hrb es la altura relativa de la rama en la copa del árbol ($1 - hb / H$), hb es la altura de la rama, H es la altura total del árbol, Lfe es la longitud foliar efectiva de la rama (cm) y $RDINC$ es la profundidad relativa de la rama en la copa, variable que en el ápice del árbol adquiere el valor 0 y valor 1 en la base de la copa (i.e. $RDINC = (H - hb) / (H - Hc)$), siendo Hc altura de la copa viva y b_1, b_2, b_3 y b_4 son los parámetros a estimar.

Debido a que algunas unidades experimentales tuvieron altas tasas de mortalidad, se utilizaron solo las parcelas más representativas, definidas como aquellas que presentaron menores tasas de mortalidad. *Eucalyptus nitens*, en el mes 23, mostró una tasa de mortalidad mayor al 50 % en la unidad experimental establecida a densidad de 10.000 árboles ha^{-1} , llegando así a una densidad de 4.898 árboles ha^{-1} ; esto provocó un cambio en los niveles máximos de densidad de rodal, situando a estas unidades experimentales como aquellas con mayor mortalidad, seguido por las unidades establecidas a 5.000 y 7.500 árboles ha^{-1} con tasas de mortalidad de 32,7 y 30 %, respectivamente.

Modelación de la distribución vertical del área foliar. La distribución vertical del área foliar a lo largo de la copa se describió mediante la función de distribución acumulada (CDF) Weibull de dos parámetros. Según Weiskittel et al. (2009), esta función describe con mayor precisión el área foliar de la copa en comparación a otras distribuciones de cuatro parámetros, tales como las funciones S_B , Johnson's y Beta. Así, la modelación de la distribución vertical del área foliar a nivel de rama se realizó con la CDF Weibull ajustada independientemente por edad, especie y densidad de plantación. También se realizaron ajustes promedio por especie, i.e. no considerando la edad ni la densidad de plantación (ecuación 4).

$$LA_{cum} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{RDINC}{b}\right)^c\right] \quad [4]$$

Donde, LF_{cum} es el área foliar acumulada desde el ápice hacia la base de la copa (cm^2), b y c son los parámetros de escala y forma de la función, respectivamente.

Evaluación del rendimiento de los modelos. Para evaluar y comparar los modelos de área foliar a nivel de rama se usaron la raíz del cuadrado medio residual (RMSE), el índice de Furnival (IF) y el índice de Akaike (AIC). La RMSE indicó la precisión promedio, el IF determinó la precisión de los modelos que presentaron la variable dependiente transformada y el AIC fue útil para evaluar la parsimonia de los modelos. Por su parte, para comparar el efecto de la densidad de plantación y de la edad del cultivo

sobre los modelos de área foliar a nivel de rama y distribución vertical de área foliar se evaluó mediante la prueba F de suma extra de cuadrados, evaluando el uso de modelos ajustados para cada edad y nivel de densidad en contraste con el ajuste promedio.

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n-p}} \quad [5]$$

$$IF = \frac{RMSE}{f'(LA)} \quad [6]$$

$$AIC = n \ln\left(\frac{SSE}{n}\right) + 2p \quad [7]$$

$$F = \frac{\frac{SSE_s - SSE_c}{p_c - p_s}}{\frac{SSE_c}{n - p_c}} \sim F_{p_c - p_s, n - p_c} \quad [8]$$

Donde, SSE es la suma de cuadrados residuales ($\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$), n es el número total de observaciones, p es el número de parámetros del modelo, $f'(LA)$ es la media geométrica de la primera derivada de la variable dependiente con respecto al área foliar observada a nivel de rama, F es el estadístico de Fisher, SSE_s es la suma residual de cuadrados para el modelo más simple (modelo promedio), SSE_c es la suma residual de cuadrados para el modelo más complejo (suma de SSE de los modelos ajustados para cada nivel de densidad y edad del cultivo), p_s y p_c son el número de parámetros en cada uno de los dos modelos. Los ajustes se realizaron con el programa SAS (SAS Institute Inc. 2018).

RESULTADOS

Área foliar a nivel de rama. El área foliar tuvo una relación más estrecha con el diámetro de rama que con las variables derivadas de altura de rama (figura 2). El tamaño del diámetro de las ramas aumentó con la edad y, la variabilidad de esta relación no se vio afectada por el estado de desarrollo del cultivo. En cambio, la variabilidad de la relación entre $LA - Hrb$ y $LA - RDINC$ aumentó con el desarrollo del cultivo, siendo mayor en orden decreciente en *A. melanoxylon*, seguido por *E. camaldulensis* y por último en *E. nitens*. Ambas relaciones son análogas en términos de variabilidad debido a que la altura de copa incorporada en la estructura del $RDINC$ no causó cambio sustancial en relación con los valores determinados para la Hrb .

En términos de precisión los mejores resultados se obtuvieron en el modelo [3]. Así, se seleccionó este modelo como el más adecuado para la modelación del área foliar a nivel de rama, a pesar de que en el mes 23 se observaron cinco estimaciones no significativas en los parámetros b_1 y b_2 , lo cual probablemente solo fue respuesta de un resultado circunstancial (cuadro 1). La precisión del ajuste disminuyó a medida que aumentó la edad del cultivo, efecto

causado por el aumento de la variabilidad del área foliar a nivel de rama a medida que aumenta la edad del cultivo (figura 2).

La precisión varió entre especies, la mayor se observó en *A. melanoxylon*, seguido de *E. camaldulensis* y *E. nitens*, tendencia que se mantuvo en el tiempo. En *A. melanoxylon*, en las tres densidades de plantación, la precisión del modelo disminuyó a medida que aumentó la edad del cultivo. En los *Eucalyptus*, esa relación solo se observó en la densidad de plantación más baja. Por su parte, no se

observó relación entre la precisión del modelo y la densidad de plantación en ninguna de las tres oportunidades de medición. En el mes 11, los ajustes más precisos en *A. melanoxylon* y *E. nitens* se produjeron en la densidad nominal de 5.000 árboles ha^{-1} , en cambio en *E. camaldulensis* se produjo en la densidad de 7.500 árboles ha^{-1} . Posteriormente, en el mes 23, la mayor precisión en *A. melanoxylon* y *E. nitens* fue en la densidad de 7.500 árboles ha^{-1} , mientras que en *E. camaldulensis* se produjo en 10.000 árboles ha^{-1} . Finalmente, en el mes 36, los *Eucalyptus* evidencia-

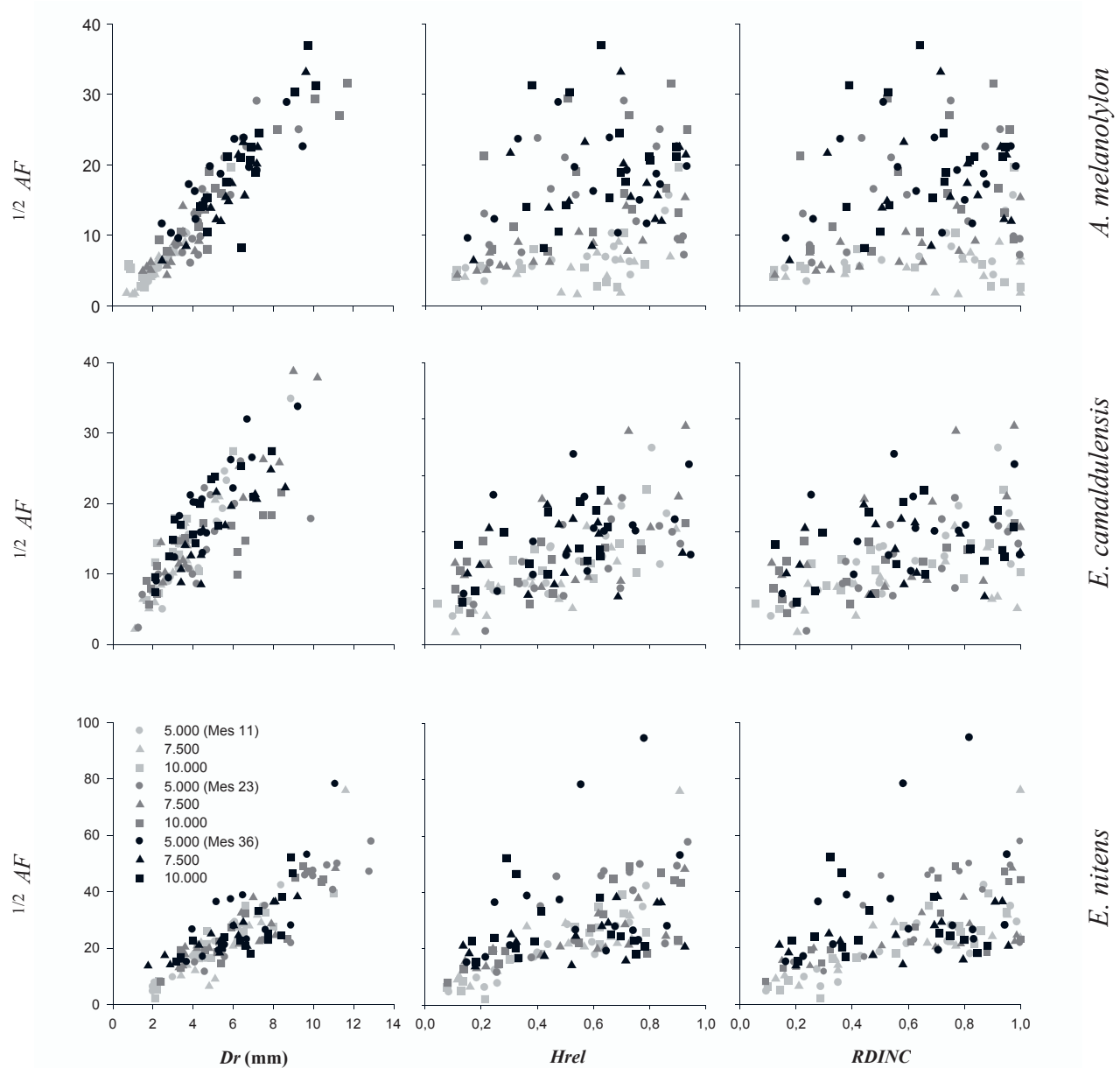


Figura 2. Relación entre el área foliar a nivel de rama (LA) (cm²) y las variables predictoras: diámetro de rama (Db) (mm), altura relativa de la rama en la copa (Hrb) y profundidad relativa de la rama en la copa ($RDINC$).

Relationship between leaf area at branch level (LA) (cm²) and predictor variables: branch diameter (Db) (mm), relative height of the branch in the crown (Hrb) and relative depth of the branch in the cup ($RDINC$).

Cuadro 1. Parámetros del modelo [3], según edad de cultivo, especie y densidad de plantación.

Model parameters [3], according to crop age, species, and planting density.

Mes	Especie	Densidad (árboles ha ⁻¹)		Parámetros estimados			RMSE	IF	AIC	P
		Nominal	Actual	b_1	b_2	b_3				
11	<i>A. melanoxylon</i>	5.000	4.592	2,5658*	1,7579*	1,4050*	0,73	10,10	67,37	
		7.500	7.194	5,1959*	1,1657*	1,6619*	0,95	08,20	53,03	
		10.000	9.592	7,4920*	1,0222*	1,5496*	2,40	26,40	87,70	
		Promedio		4,3358*	1,3615*	1,4890*	1,65	18,29	229,57	0,1195
	<i>E. camaldulensis</i>	5.000	5.000	10,4542*	0,9662*	2,1921*	2,26	65,36	128,05	
		7.500	7.500	9,8833*	0,9799*	2,0137*	1,95	36,92	110,91	
		10.000	9.796	16,1151*	0,7753*	1,9130*	2,87	72,18	131,03	
		Promedio		12,5331*	0,8616*	2,0208*	2,86	68,51	383,32	0,0036
	<i>E. nitens</i>	5.000	5.000	7,5628*	1,2113*	1,7500*	2,19	73,23	131,46	
		7.500	7.347	1,8646*	1,9037*	1,8629*	4,81	184,39	159,16	
		10.000	9.592	18,8065*	0,6861*	2,0361*	3,78	123,01	147,02	
		Promedio		7,0040*	1,2303*	1,9081*	5,64	195,65	477,76	<0,0001
23	<i>A. melanoxylon</i>	5.000	3980	4,1195*	1,2931*	1,5195*	3,15	84,48	135,75	
		7.500	5.816	6,8607ns	0,9506*	1,6705*	2,38	35,53	109,76	
		10.000	7.551	9,9060*	0,8099*	1,6351*	3,58	112,11	144,24	
		Promedio		7,4141*	0,9553*	1,6291*	3,14	72,97	389,00	0,2907
	<i>E. camaldulensis</i>	5.000	4.898	14,6572ns	0,6198ns	1,8448*	4,34	110,85	143,90	
		7.500	7.500	8,7416*	0,9937*	1,5854*	4,94	168,51	146,18	
		10.000	9.592	14,6291*	0,5866*	1,6278*	1,92	48,06	118,82	
		Promedio		10,3757*	0,8524*	1,6814*	4,29	119,36	423,72	0,0521
	<i>E. nitens</i>	5.000	3.367	2,6999ns	1,5300*	1,4069*	6,56	407,90	182,98	
		7.500	5.204	4,8773*	1,3267*	-0,7499*	4,57	203,59	162,14	
		10.000	4.898	5,4189ns	1,3081*	1,4813*	5,05	252,65	168,61	
		Promedio		8,0436*	1,0977*	1,6021*	5,73	296,67	515,23	0,1450
36	<i>A. melanoxylon</i>	5.000	3.980	14,7388*	0,6301*	1,6153*	2,78	94,53	139,12	
		7.500	5.816	3,4689*	1,3474*	1,4682*	2,48	79,16	133,80	
		10.000	7.551	4,0070*	1,3493*	2,0795*	3,80	144,66	151,88	
		Promedio		7,5122*	0,9782*	1,6860*	3,64	125,92	438,11	0,0050
	<i>E. camaldulensis</i>	5.000	4.898	13,2602*	0,8172*	1,7143*	4,40	159,66	154,84	
		7.500	7.500	10,3244*	0,7484*	1,4693*	3,60	114,88	144,97	
		10.000	9.592	14,2462*	0,6967*	1,4143*	3,29	110,49	143,80	
		Promedio		14,3398*	0,6758*	1,5638*	4,33	146,77	451,89	0,0141
	<i>E. nitens</i>	5.000	3.367	3,1647*	1,5821*	1,1724*	7,60	474,29	187,51	
		7.500	5.204	13,5896*	0,8269*	1,4975*	4,23	193,19	160,56	
		10.000	4.898	3,1441*	1,3847*	0,9249*	3,99	201,02	161,75	
		Promedio		2,8738*	1,5837*	1,2362*	7,30	382,50	538,10	0,0015

*: Denota significancia del parámetro ($P < 0,05$); ns: denota no-significancia del parámetro ($P \geq 0,05$); *RMSE*: raíz del cuadrado medio residual (cm); *IF*: índice de Furnival (cm²); *AIC*: índice de Akaike; *P*: probabilidad asociada a la prueba de suma extra de cuadrados evaluando el efecto de la densidad de plantación en cada condición.

ron mayor precisión en 10.000 árboles ha⁻¹ y en *A. melanoxylon* se observó en 7.500 árboles ha⁻¹.

En general, tanto la densidad de plantación como la edad del cultivo no evidenciaron relación con los parámetros estimados del modelo [3]. El efecto de la densidad de rodal sobre los parámetros del modelo de área foliar a nivel de rama se manifestó solo en algunas oportunidades de medición (cuadro 1). Tempranamente, transcurridos 11 meses desde el establecimiento del ensayo se evidenció efecto de la densidad de plantación en *E. camaldulensis* y *E. nitens* ($P = 0,0036$ y $P < 0,0001$, respectivamente). Sin embargo, estos resultados pudieran estar influenciados por la alta variabilidad que presentó el cultivo en las primeras etapas del crecimiento, considerándose un resultado circunstancial y probablemente sin relación con la densidad de rodal, ya que a esa edad no se alcanzó el cierre de copas. A los 23 meses de establecido el ensayo, en tanto, no se evidenciaron efectos significativos de la densidad de plantación en ninguna de las especies, resultados que sugieren solo una modelación promedio del área foliar, es decir, sin considerar la densidad de rodal a esta edad. A los 36 meses, se encontró efecto significativo de la densidad de plantación sobre los parámetros del modelo de área foliar de rama, resultado que se evidenció en las tres especies (*A. melanoxylon* $P = 0,0050$, *E. camaldulensis* $P = 0,0141$ y *E. nitens* $P = 0,0015$).

En la mayoría de las densidades de plantación existió efecto de la edad de cultivo sobre los parámetros del modelo de área foliar de rama en las tres especies (cuadro 2). Solo en *A. melanoxylon* establecida en 7.500 y 10.000 árboles ha⁻¹ el efecto no fue significativo ($P = 0,05$ y $P = 0,13$, respectivamente), indicando que esta especie aún no ha alcanzado niveles de competencia intraespecífica que

condicionen el desarrollo de área foliar a nivel de rama. Las especies del género *Eucalyptus*, por su parte, manifestaron el efecto de la edad de cultivo sobre los modelos de área foliar en las tres densidades de plantación, siendo altamente significativo en *E. nitens*; este resultado sugiere realizar la modelación de manera independiente para cada oportunidad de medición. Los resultados fueron consistentes, ya que a medida que el cultivo creció, mayor fue el nivel de competencia por los recursos del sitio, lo cual tuvo implicancias directas sobre la morfología de los árboles, *i.e.* área foliar. En cuanto a los parámetros estimados, no se observó ninguna relación de estos con la densidad de rodal. La precisión del ajuste disminuyó en los *Eucalyptus* spp. a medida que aumentó la densidad nominal de plantación; en *A. melanoxylon*, no se observó relación.

Distribución vertical del área foliar. El efecto de la densidad de plantación sobre la distribución foliar vertical fue altamente significativo en la mayoría de los casos ($P < 0,0001$) (cuadro 3), lo cual sugiere que la modelación debe realizarse de manera independiente para cada oportunidad de medición. Los parámetros b y c de la PDF Weibull, fueron significativos en todos los casos. En general, en las dos primeras oportunidades de medición el valor del parámetro de escala (b) fue mayor en la densidad nominal 7.500 árboles ha⁻¹, pero a la edad de 36 meses este parámetro no mostró relación con la densidad de rodal en ninguna de las especies estudiadas, mientras que el parámetro de forma (c) manifestó, en algunos casos, relación inversa con la densidad de rodal. La precisión del modelo no dependió de la densidad de rodal ni de la edad del cultivo.

Cuando se ajustó el modelo promedio, *i.e.* ajustando el modelo con información de todas las edades, se evidenció

Cuadro 2. Parámetros del modelo [3] obtenidos del ajuste con datos de todas las edades, según especie y densidad de plantación.

Model parameters [3] obtained from the adjustment with data from all tree ages, according to species and planting density.

Especie	Densidad Nominal (árboles ha ⁻¹)	Parámetros estimados			RMSE	P
		b_1	b_2	b_3		
<i>A. melanoxylon</i>	5.000	7,0243*	1,0148*	1,6120*	2,96	0,0054
	7.500	4,6680*	1,2025*	1,5286*	2,03	0,0500
	10.000	8,7245*	0,8955*	1,7251*	3,56	0,1264
<i>E. camaldulensis</i>	5.000	10,8819*	0,8651*	1,7347*	4,37	0,0114
	7.500	8,8543*	0,9543*	1,7145*	4,04	0,0422
	10.000	17,9499*	0,5688*	1,7030*	3,28	0,0038
<i>E. nitens</i>	5.000	5,0300*	1,3304*	1,4284*	8,13	< 0,0001
	7.500	4,9425*	1,3691*	1,5496*	6,50	< 0,0001
	10.000	4,8374*	1,3079*	1,3243*	5,60	0,0002

*: Denota significancia del parámetro ($P < 0,05$); RMSE: raíz del cuadrado medio residual (cm); P: probabilidad asociada a la prueba de suma extra de cuadrados evaluando el efecto de la edad de cultivo en cada condición.

Cuadro 3. Parámetros de la función de distribución acumulada Weibull, según edad de cultivo, especie y densidad de plantación.
 Parameters of the Weibull cumulative distribution function, according to crop age, species and planting density.

Mes	Especie	Densidad (árboles ha ⁻¹)		Parámetros estimados		RMSE	P
		Nominal	Actual	b	c		
11	<i>A. melanoxylon</i>	5.000	4.592	0,7599*	3,0599*	0,0926	0,0125
		7.500	7.194	0,7855*	2,8035*	0,1341	
		10.000	9.592	0,7584*	2,5649*	0,1395	
		Promedio		0,7654*	2,8247*	0,1196	
	<i>E. camaldulensis</i>	5.000	5.000	0,7898*	3,9944*	0,0672	
		7.500	7.500	0,7950*	3,5861*	0,1080	
		10.000	9.796	0,7709*	3,4280*	0,0617	
		Promedio		0,7851*	3,6413*	0,1171	
	<i>E. nitens</i>	5.000	5.000	0,8649*	3,8255*	0,0915	
		7.500	7.347	0,8896*	4,3518*	0,0904	
		10.000	9.592	0,8387*	3,7810*	0,0803	
		Promedio		0,8647*	3,9794*	0,0915	
23	<i>A. melanoxylon</i>	5.000	3.980	0,6819*	2,8295*	0,0700	<0,0001
		7.500	5.816	0,7396*	3,0502*	0,0635	
		10.000	7.551	0,6577*	2,9078*	0,0638	
		Promedio		0,6917*	2,8322*	0,0748	
	<i>E. camaldulensis</i>	5.000	4.898	0,7331*	3,3580*	0,0976	
		7.500	7.500	0,7425*	2,9729*	0,0931	
		10.000	9.592	0,7113*	2,7735*	0,0949	
		Promedio		0,7298*	3,0642*	0,0972	
	<i>E. nitens</i>	5.000	3.367	0,8259*	4,1777*	0,0623	
		7.500	5.204	0,7540*	2,6014*	0,0938	
		10.000	4.898	0,7998*	2,9685*	0,0870	
		Promedio		0,7964*	3,1409*	0,0947	
36	<i>A. melanoxylon</i>	5000	3980	0,7113*	3,0887*	0,0821	< 0,0001
		7500	5816	0,7353*	3,1288*	0,1224	
		10000	7551	0,7075*	4,0785*	0,0937	
		Promedio		0,7166*	3,4115*	0,1012	
	<i>E. camaldulensis</i>	5.000	4.898	0,7062*	2,7683*	0,0960	
		7.500	7.500	0,6316*	2,2117*	0,0917	
		10.000	9.592	0,6588*	2,1471*	0,1030	
		Promedio		0,6670*	2,3182*	0,1039	
	<i>E. nitens</i>	5.000	3.367	0,7549*	2,4115*	0,0844	
		7.500	5.204	0,7421*	2,4371*	0,0920	
		10.000	4.898	0,6189*	2,0940*	0,1213	
		Promedio		0,7089*	2,2294*	0,1132	

*: Denota significancia del parámetro ($P < 0,05$); *RMSE*: raíz del cuadrado medio residual; *P*: probabilidad asociada a la prueba de suma extra de cuadrados evaluando el efecto de la densidad de plantación en cada condición.

efecto altamente significativo de la edad de cultivo sobre el modelo de distribución vertical del área foliar en las tres especies y en las tres densidades de plantación (cuadro 4); ello sugiere que la modelación debe realizarse independientemente para cada oportunidad de medición. Por su parte, todos los parámetros de escala y forma de la CDF Weibull en cada especie y densidad resultaron significativos, presentando relación inversa con la densidad de plantación. Los resultados también indican que la precisión del ajuste aumentó en *A. melanoxylon* y *E. nitens* a medida que aumentó la densidad de plantación; en *E. camaldulensis* no se observó tendencia.

En general, la distribución vertical del área foliar fue similar en las tres especies (figura 3). La mayor proporción del área foliar del árbol se concentró en la zona basal de la copa, y se fue desplazando hacia la parte superior a medida que transcurrió el tiempo. En las especies del género *Eucalyptus*, la distribución vertical del área foliar comenzó a concentrarse en las partes más altas de la copa a medida que se desarrolló el cultivo, siendo la edad un factor que manifiesta de manera intrínseca la densidad del rodal, condicionando el despliegue y la distribución vertical del área foliar. En *A. melanoxylon*, aunque los resultados de la prueba suma extra de cuadrados indican que hay efectos altamente significativos de la edad sobre la distribución vertical del área foliar (cuadro 4), en esta especie el efecto de la edad no se percibe de manera clara cuando se evalúa gráficamente el efecto (figura 3).

La distribución vertical del área foliar de *A. melanoxylon* en las densidades nominal 5.000 y 7.500 árboles ha⁻¹ fue similar y difiere claramente con aquella de la densidad 10.000 árboles ha⁻¹ (figura 3). Es probable que dicho resultado se deba a la alta competencia entre árboles en la

densidad más alta. En los *Eucalyptus* spp., por su parte, la distribución vertical del área foliar varió significativamente con el desarrollo del cultivo, aumentando el follaje en dirección del ápice. En estas especies la competencia se generó a edades muy tempranas debido a altas tasas de crecimiento, lo cual se manifestó en la estructura de la copa de los árboles.

DISCUSIÓN

La pendiente de la relación área foliar de la rama y diámetro de copa es independiente de la densidad de plantación y de la edad de cultivo. Los resultados de este estudio concuerdan con lo establecido por varios autores en lo relativo de la estrecha relación existente entre el área foliar y el diámetro de rama (DeRose 2004, Meyer 2005). Estos estudios también han utilizado la profundidad relativa en la copa (*RDINC*) como una variable explicatoria en sus modelos, coincidiendo en la alta variabilidad que manifiesta la relación directa entre esta variable y el área foliar de rama. Mayor cantidad de área foliar se registró en *E. nitens* en comparación a *E. camaldulensis* y *A. melanoxylon*, lo que se explicaría por la mayor anchura de copas de esta especie tal como lo demostraron Geldres *et al.* (2006) y que es coincidente con lo expuesto por Weiskittel *et al.* (2009) en cuanto a que la cantidad de follaje depende de la morfología de cada especie y de los tratamientos silvícolas aplicados.

El modelo [3] resultó el más adecuado para modelar el área foliar a nivel de rama. La selección del modelo se realizó considerando su precisión (*RMSE* e *IF*), parsimonia (*AIC*) y número de parámetros significativos, coincidiendo con lo realizado por Gao *et al.* (2022). En este estudio el

Cuadro 4. Parámetros de la función distribución acumulada Weibull, según especie y densidad de plantación.

Parameters of the Weibull cumulative distribution function, according to species and planting density.

Especie	Densidad Nominal (árboles ha ⁻¹)	Parámetros estimados		RMSE	P
		b	c		
<i>A. melanoxylon</i>	5.000	0,7126*	2,9188*	0,0865	< 0,0001
	7.500	0,7458*	3,0272*	0,1075	< 0,0001
	10.000	0,7017*	3,1744*	0,1090	< 0,0001
<i>E. camaldulensis</i>	5.000	0,7385*	3,1868*	0,1014	< 0,0001
	7.500	0,7239*	2,6188*	0,1256	< 0,0001
	10.000	0,7112*	2,5070*	0,1084	< 0,0001
<i>E. nitens</i>	5.000	0,8090*	3,1177*	0,1019	< 0,0001
	7.500	0,7844*	2,7064*	0,1172	< 0,0001
	10.000	0,7391*	2,3957*	0,1445	< 0,0001

*: Denota significancia del parámetro ($P < 0,05$); *RMSE*: raíz del cuadrado medio residual; *P*: probabilidad asociada a la prueba de suma extra de cuadrados evaluando el efecto de la edad de cultivo en cada condición.

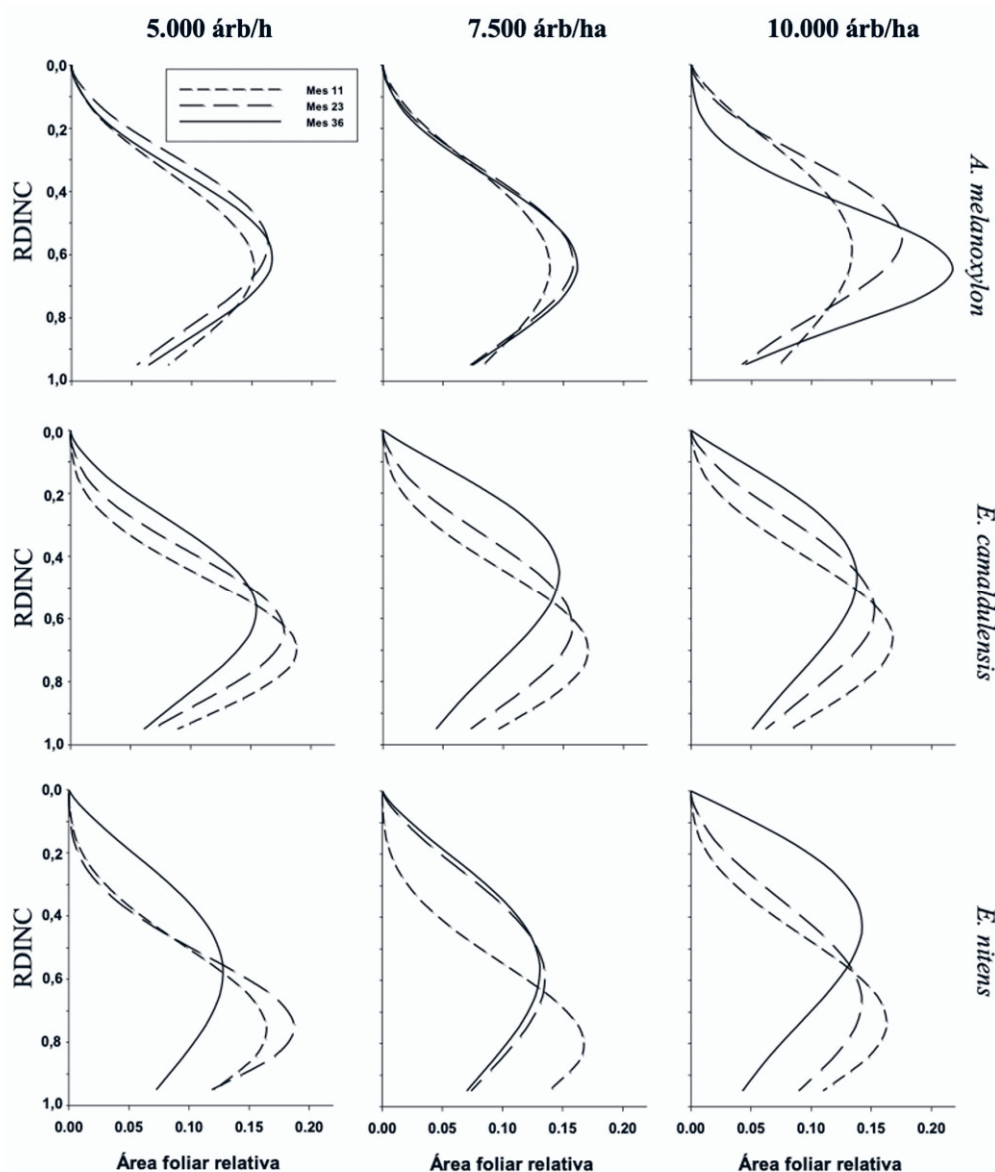


Figura 3. Distribución del área foliar relativa de rama estimada mediante la función de distribución acumulada Weibull, según edad del cultivo, especie y densidad de plantación. *RDINC*: es la profundidad relativa de la rama en la copa.

Distribution of relative leaf area of the branch estimated using the Weibull cumulative distribution function, according to crop age, species, and planting density. *RDINC*: is the relative depth of the branch in the crown.

modelo [3] corresponde al modelo [2] restringiendo uno de sus parámetros ($b_4 = 1$). Este último ha sido utilizado por varios autores, quienes resaltan su capacidad de predicción y también han modificado su estructura, pero manteniendo las variables predictoras diámetro de rama y *RDINC* (DeRose 2004, Meyer 2005, Weiskittel *et al.* 2009). Al igual que Weiskittel *et al.* (2009), el modelo [3] arrojó la mayoría de los parámetros significativos y logró alta precisión en todos los ajustes. Similares resultados reportaron DeRose (2004) y Meyer (2005), donde los modelos de área foliar a nivel de rama fueron ajustados para diferentes especies de coníferas obteniendo buenas estimaciones. En

este estudio, en la mayoría de los casos, se detectaron efectos significativos de la densidad rodal y la edad del cultivo sobre los parámetros del modelo de área foliar.

La modelación de la distribución del área foliar a nivel de rama a lo largo de la copa mediante la CDF Weibull es satisfactoria. En literatura se han utilizado varias funciones para modelar la distribución del área foliar (Garber y Maguire 2005, Jerez *et al.* 2005), pero Maguire *et al.* (1998) mencionaron que Weibull es la mejor función en cuanto a precisión. Mori y Hagihara (1991) describieron la distribución vertical del área foliar de árboles establecidos en cultivos de corta rotación y obtuvieron resultados similares

en términos de precisión a los reportados en este estudio. La estimación de parámetros de la CDF Weibull, en tanto, fue significativa para todas las condiciones de ajuste (*i.e.* especie, densidad de plantación y edad de cultivo). Concorrando con estos resultados, Weiskittel *et al.* (2009) reportaron todos los parámetros significativos de la modelación de la distribución vertical foliar de varias coníferas (*Abies balsamea* (L.) Mill., *Thuja occidentalis* (L.), *Tsuga canadensis* (L.) Carr., *Pinus strobus* (L.), *Picea rubens* (Sarg.)).

La densidad de rodal afecta la estructura de la copa, lo cual tiene implicancias sobre la cantidad de follaje. En la densidad nominal de 10.000 árboles ha⁻¹ se evidenció que la distribución relativa del área foliar tiende a concentrarse en la parte alta de la copa. Este efecto se percibe con mayor claridad en las especies de *Eucalyptus* aquí evaluadas. Algunos autores han reportado que, a mayores densidades de rodal, los árboles presentan una disminución del área foliar debido a que los individuos pierden el follaje cercano a la base de la copa por la poca luminosidad que llega a esas zonas del árbol (Maguire *et al.* 1998, Pretzsch 2019). Garber y Maguire (2005), mencionaron que la densidad de rodal y la composición de las especies condicionan la dimensión y estructura de la copa. Los resultados de este estudio también coinciden con los reportados por (Alcorn *et al.* 2013), quienes mencionaron que una vez que las especies del género *Eucalyptus* están sometidas a cierre de copas, el área foliar declina sustancialmente. Por su parte, en *A. melanoxylon* el efecto de la densidad de rodal no se manifestó en las primeras fases de crecimiento evaluado.

En el presente estudio la edad del cultivo presentó efecto sobre la distribución vertical del área foliar, coincidiendo con los resultados obtenidos por Jerez *et al.* (2005), quienes registraron que la edad del rodal tenía influencia significativa sobre la distribución del área foliar en *Pinus taeda* L. La distribución vertical del área foliar en los *Eucalyptus* spp. fue similar, con una máxima concentración del área foliar en aproximadamente la mitad de la copa. Alcorn *et al.* (2013) evaluaron la distribución de área foliar en plantaciones 4 años de edad de *Eucalyptus pihularis* Sm. y *E. cloeziana* F. Muell, determinando que el follaje de árboles presentaba un desplazamiento hacia la parte superior de la copa. En *A. melanoxylon*, el punto máximo de distribución vertical del área foliar se presentó desde la mitad hacia la base de la copa. Gilmore y Seymour (1997) presentaron resultados similares en *Abies balsamea* L. Mill y *Picea rubens* Sarg., mencionando que la mayor concentración de área foliar ocurre en el 45 % inferior de la copa y que en *Pinus ponderosa* Dougl. y *Thuja occidentalis* L. ese punto se encuentra bajo el 60 % de la longitud total de la copa viva de los árboles.

Las funciones generadas en este estudio permiten evaluar el efecto de la densidad de rodal en las primeras fases de crecimiento de cultivos con fines dendroenergéticos. Las especies aquí evaluadas son de uso frecuente en este tipo de cultivos, tanto por su alta capacidad de adaptarse a variadas condiciones climáticas y por sus altas tasas de

crecimiento inicial. Las densidades de plantación evaluadas corresponden a límites de establecimiento silvícola, donde la competencia intraespecífica por los recursos del sitio se produce en los primeros meses de establecidos los cultivos. El set de ecuaciones permite generar antecedentes preliminares de la arquitectura de copa y su comportamiento bajo altos niveles de competencia. Esta información podría ser de utilidad para definición de esquemas de plantación en cultivos que tengan la finalidad de generar altos niveles de biomasa en las primeras fases de crecimiento. En Acuña *et al.* (2018a) y Sandoval *et al.* (2021) se exponen en detalle antecedentes del efecto de la densidad de rodal sobre el crecimiento inicial, biomasa aérea y la supervivencia de los árboles de este ensayo.

CONCLUSIONES

El diámetro de rama está estrecha y directamente relacionado con el área foliar y la pendiente de esa relación es independiente de la edad del cultivo ni de la densidad de plantación. Las variables profundidad relativa de la rama en la copa (*RDINC*) y el diámetro basal de la rama (*Db*) generaron la mejor capacidad de predicción en los modelos testeados para las tres especies evaluadas en cultivos dendroenergéticos.

El mejor modelo para predecir el área foliar a nivel de rama fue el modelo [3], seleccionado según criterios de precisión, parsimonia y considerando el número de parámetros significativos. El efecto de la densidad de plantación sobre los parámetros del modelo de área foliar a nivel de rama fue significativo en el mes 36. En el mes 11, se observó efecto de la densidad de plantación significativo en los parámetros del modelo, sin embargo, este resultado probablemente esté influenciado por la alta variabilidad del área foliar en fases tempranas del crecimiento. En el mes 23 no hay efectos significativos de la densidad de rodal, pero ya en la última oportunidad de medición se observó efecto sobre los parámetros del modelo de área foliar. Así, estos resultados sugieren ajustes individuales por densidad de plantación a partir del mes 36. Por su parte, la edad del cultivo fue significativa en la mayoría de los casos, justificando el uso de modelos ajustados independiente por edad de cultivo.

La función de distribución Weibull que incorporó la variable *RDINC* para modelar el área foliar a nivel de rama, evidenció todos sus parámetros significativos. En esta función, el efecto de la densidad de plantación y la edad del cultivo sobre los parámetros fue significativo en todos los casos; estos resultados sugieren la utilización de modelos independientes para cada densidad de plantación y edad del cultivo.

La estrategia de modelación evaluada en este estudio resultó una opción precisa para la estimación del área foliar a nivel de rama y árbol. Esta variable podría ser utilizada como un indicador de la condición de desarrollo del cultivo y de su competencia intraespecífica.

REFERENCIAS

- Acuña E, J Cancino, R Rubilar, M Espinosa, F Muñoz. 2012. Informe final proyecto Innova Bio Bio N° 06-PC S1-33: Desarrollo de protocolos para la producción de biomasa de especies forestales de rápido crecimiento y corta rotación para la generación de bioenergía. Concepción, Chile. Universidad de Concepción-Innova Bio-Bio. 172 p.
- Acuña E, J Cancino, R Rubilar, S Sandoval. 2018a. Above-ground biomass growth and yield of first rotation cutting cycle of Acacia and Eucalyptus short rotation dendroenergy crops. *Revista Arvore* 41(6): e410608. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600008>
- Acuña E, R Rubilar, J Cancino, TJ Albaugh, CA Maier. 2018b. Economic assessment of Eucalyptus globulus short rotation energy crops under contrasting silvicultural intensities on marginal agricultural land. *Land Use Policy* 76: 329-337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.028>
- Alcorn PJ, DI Forrester, RGB Smith, DS Thomas, RN James, AB Nicotra, J Bauhus. 2013. Crown structure and vertical foliage distribution in 4-year-old plantation-grown Eucalyptus pilularis and Eucalyptus cloeziana. *Trees - Structure and Function* 27(3): 555-566. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0809-1>
- CIREN (Centro de Investigación de Recursos Naturales, CL). 1999. Estudio agrológico VIII Región. Descripción de suelos, materiales y símbolos. Publicación N° 121. Tomos I y II. Santiago, Chile. Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIREN). 25 p.
- Dahal B, KP Poudel, HJ Renninger, JJ Granger, TD Leininger, ES Gardiner, RA Souter, RJ Rousseau. 2022. Above-ground biomass equations for black willow (*Salix nigra* Marsh.) and eastern cottonwood (*Populus deltoides* Bart. ex Marsh.). *Trees, Forests and People* 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100195>
- DeRose RJ. 2004. Leaf area index-relative density relationships in even-aged *Abies balsamea*-*Picea rubens* stands in Maine. Tesis Masters of Forestry Science. Orono, ME. The Graduate School, University of Maine. 83 p. <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd/454/>
- Dong L, FR Almay Widagdo, L Xie, F Li. 2020. Biomass and volume modeling along with carbon concentration variations of short-rotation poplar plantations. *Forests* 11(7): 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/F11070780>
- Gao H, Q Liu, Y Song, M Jiang, Y Yin. 2022. Modeling primary branch diameter and length for planted *Pinus koraiensis* by incorporating neighbor competition in Northeast China. *Forests* 13(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060912>
- Garber SM, DA Maguire. 2005. The response of vertical foliage distribution to spacing and species composition in mixed conifer stands in central Oregon. *Forest Ecology and Management* 211(3): 341-355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.053>
- Geldres E, V Gerding, JE Schlatter. 2006. Biomass of 4-7 year-old Eucalyptus nitens in a stand in the X Region, Chile. *Bosque* 27(3): 223-230. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002006000300001>
- Gilmore DW, RS Seymour. 1997. Crown architecture of *Abies balsamea* from four canopy positions. *Tree Physiology* 17(2): 71-80. DOI: <https://doi.org/10.1093/tree-phys/17.2.71>
- Jerez M, TJ Dean, QV Cao, SD Roberts. 2005. Describing leaf area distribution in Loblolly pine trees with Johnson's SB function. *Forest Science* 51(2): 93-101. <https://academic.oup.com/forestscience/article/51/2/93/4617579>
- Maguire DA, JC Brissette, L Gu. 1998. Crown structure and growth efficiency of red spruce in uneven-aged, mixed-species stands in Maine. *Canadian Journal of Forest Research* 28(8): 1233-1240. DOI: <https://doi.org/10.1139/x98-093>
- Meyer SR. 2005. Leaf area as a growth predictor of *Abies balsamea* and *Picea rubens* in managed stands in Maine. Tesis Masters of Forestry Science. Orono, ME. The Graduate School, University of Maine. 117 p. <https://scholar.google.com/scholar?q=Meyer+S.R.%2C+2005.+Leaf+area+as+a+growth+predictor+of+Abies+balsamea+and+Picea+rubens+in+managed+stands+in+Maine.+Master's+thesis%2C+University+of+Maine%2C+Orono%2C+117+p>
- Morales M, G Aroca, R Rubilar, E Acuña, B Mola-Yudego, S González-García. 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *Journal of Cleaner Production* 99(1): 239-249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>
- Mori S, A Hagihara. 1991. Crown profile of foliage area characterized with the Weibull distribution in a hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) stand. *Trees* 5(3): 149-152. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00204336>
- Morkovina SS, L Keča. 2019. Economic assessment of forest plantations with short rotation: Russia and Serbia experience. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 226(1): 012072. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012072>
- Parresol BR. 2003. Recovering parameters of Johnson's SB distribution. Asheville, NC, USA. Southern Research Station, Forest Service, US Department of Agriculture. 9 p. https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C11&q=Recovering+parameters+of+Johnson%27s+SB+distribution.+Asheville%2C+NC%2C+USA.+Southern+Research+Station%2C+Forest+Service%2C&btnG=
- Pretzsch H. 2019. The effect of tree crown allometry on community dynamics in mixed-species stands versus monocultures. A review and perspectives for modeling and silvicultural regulation. *Forests* 10(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090810>
- Resquin F, RM Navarro-Cerrillo, L Carrasco-Letelier, C Rachid-Casnati. 2020. Influence of age and planting density on the energy content of Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii and Eucalyptus grandis planted in Uruguay. *New Forests* 51(4): 631-655. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09749-2>
- Ríos-Saucedo JC, E Acuña-Carmona, J Cancino-Cancino, R Rubilar-Pons, JJ Corral-Rivas, R Rosales-Serna. 2017. Dynamics of sprouting and basic density of wood in shoots of three wood species with dendroenergy potential. *Agrociencia* 51(2): 215-227. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000200215&script=sci_arttext&tlng=en
- Rockwood DL, MF Ellis, KW Fabbro. 2022. Economic potential for carbon sequestration by short rotation eucalypts using biochar in Florida, USA. *Trees, Forests and People* 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100187>
- Sandoval S, E Acuña, J Cancino, R Rubilar. 2021. Modeling natural mortality for different plant densities in dendroenergy-

- tic trials. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias 53(2): 143-156. DOI: <https://doi.org/10.48162/rev.39.048>
- SAS Institute Inc. 2018. SAS/STAT®15.1 User's Guide. Cary, NC. SAS Institute Inc. 10393 p.
- Tripathi AM, E Pohanková, M Fischer, M Orság, M Trnka, K Klem, MV Marek. 2018. The evaluation of radiation use efficiency and leaf area index development for the estimation of biomass accumulation in short rotation poplar and annual field crops. Forests 9(4): 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9040168>
- Weiskittel AR, JA Kershaw, PV Hofmeyer, RS Seymour. 2009. Species differences in total and vertical distribution of branch- and tree-level leaf area for the five primary conifer species in Maine, USA. Forest Ecology and Management 258(7): 1695-1703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.035>
- Weiskittel AR, DA Maguire, SM Garber, A Kanaskie. 2006. Influence of Swiss needle cast on foliage age-class structure and vertical foliage distribution in Douglas-fir plantations in north coastal Oregon. Canadian Journal of Forest Research 36(6): 1497-1508. DOI: <https://doi.org/10.1139/x06-044>

Recibido: 29.04.21

Aceptado: 04.12.22

