

## Modelos de estructura de ramas para *Pinus taeda*: contribución al desarrollo de herramientas que permitan evaluar la calidad del fuste y planificar su trozado.

Branches structure models for *Pinus taeda*: a contribution to the development of tools that allow for evaluate bole quality and bucking planning.

Sañudo, G.<sup>2</sup>; Yapura, P.<sup>1,2</sup>; Fassola, H. E.<sup>3</sup>; Winck, R. A.<sup>3</sup>; Barth, S.<sup>3</sup>; Crechi, E. H.<sup>3</sup>; Keller, A. E.<sup>3</sup> y Caraballo, H.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP). Correo-e: ypf@agro.unlp.edu.ar. Diagonal 113 N° 469, (1900) La Plata, Buenos Aires.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP). Avenida 60 esquina 119, (1900) La Plata, Buenos Aires.

<sup>3</sup>EEA Montecarlo (INTA), Avenida El Libertador N° 2472, (3384) Montecarlo, Misiones.

El trabajo se desarrolló como parte del Proyecto de Investigación Aplicada (PIA) N.º 14072, Programa de Competitividad y Sustentabilidad Forestal - BID 2853, Unidad para el Cambio Rural (UCAR), Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.

### Abstract

Being able to predict the quality and value of forest products is much desired by the timber industry. The final price and quality of the wood is largely determined by knots and internodes length. To model size and distribution of knots, as well as internodes length, a good understanding of crown architecture is needed. In order to contribute to this goal, several models were developed for *Pinus taeda* in Misiones province.

**Keywords:** tree crown, simulation, branch architecture

### Resumen extendido

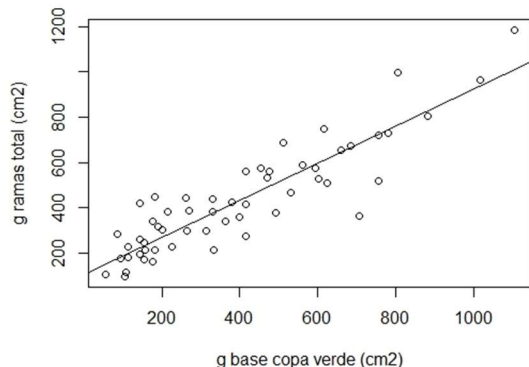
La posibilidad de predecir la calidad y valor de los productos forestales es de gran interés por el sector foresto-industrial. En relación a la madera rolliza, la cantidad y el tamaño de nudos, así como la longitud de los entrenudos, influyen en gran medida sobre su calidad y precio final. Para modelizar el tamaño y distribución de los nudos a lo largo del fuste, así como la longitud de los internodios, resulta necesario un acabado entendimiento de la arquitectura de la copa (Weiskittel *et al.*, 2010). Con el objetivo de contribuir al desarrollo de herramientas para abordar los aspectos mencionados, se ajustó un conjunto de funciones que permiten modelizar las principales variables que describen la estructura de la copa, tales como la distancia entre verticilos (DV) y el área basal de las ramas (GR) (Trincado, 2006; Mäkinen y Song, 2000). A lo anterior se sumaron las funciones de forma del fuste disponibles (Yapura *et al.*, 2016) y un algoritmo basado en cadenas de Markov, con la finalidad de consolidar un modelo de simulación de estructura de copas mediante la programación de rutinas con el lenguaje de programación Visual Basic for Applications (VBA) y el empleo de planillas de cálculo.

Las bases de datos empleadas provienen de ensayos de densidad de plantación e intensidades de poda de *P. taeda* ubicados en la provincia de Misiones, desarrollados por INTA EEA Montecarlo. Las mismas contienen información que permite caracterizar el fuste y la estructura de ramas de cada uno de los 130 árboles relevados. Esta información comprende mediciones del diámetro del fuste en la base de cada verticilo con ramas vivas, así como la altura de inserción de los mismos y el diámetro de cada una de las ramas (en el punto de inserción al fuste). El rango de edades cubierto fue de 3 a 21 años, las densidades ensayadas abarcaron desde 150 hasta 1600 individuos por hectárea y las intensidades de poda variaron desde 0% a 70 % de remoción de copa verde. La etapa de estadística descriptiva y ajuste de modelos se desarrolló con el programa estadístico R. En primera instancia se ajustaron regresiones entre la sección del fuste y la sección de las ramas vivas, tanto para la copa completa como para cualquier porción de la misma (figuras 1.a y 1.b). Estas relaciones fueron postuladas inicialmente en el marco de la "teoría de los conductos" y han sido consideradas por muchos investigadores (Mäkinen y Mäkelä, 2002; Fassola *et al.*, 2008).

Para la variable distancia entre verticilos se ajustó un modelo empírico de distribución de probabilidades, con excelente bondad de ajuste (error cuadrático medio de los errores menor a 0,0001), el cual se detalla a continuación.

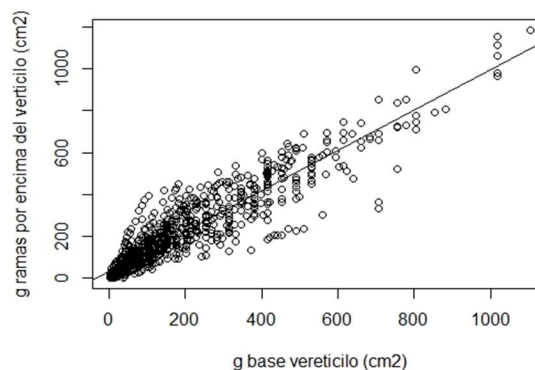
$$P = 0,815 \cdot DV^6 - 5,597 \cdot DV^5 + 14,91 \cdot DV^4 - 19,06 \cdot DV^3 + 11,11 \cdot DV^2 - 1,31 \cdot DV + 0,026$$

Donde, P es la probabilidad relativa acumulada, y el dominio del modelo se restringe al siguiente rango:  $0 < DV < 1,8$ .



**Figura 1.a.** Relación entre la sección del fuste en la base de la copa viva y la sección de las ramas vivas comprendidas en la totalidad de la copa verde.

$$GRT = 0,8155 \cdot GBCV + 108,2 \quad (R^2 = 0,803)$$



**Figura 1.b.** Relación entre la sección del fuste y la sección de las ramas vivas por encima de la sección del fuste considerada.

$$GRP = 0,964 \cdot GBV + 32,05 \quad (R^2 = 0,858)$$

Se representa con puntos la dispersión de las variables y con trazo continuo la recta de regresión. Al pie de cada gráfico se detalla la ecuación de la recta de regresión y el valor del coeficiente de determinación  $R^2$ . Figura 1.a: relación entre la sección del fuste en la base de la copa verde (GBCV) y la sumatoria de la sección transversal de las bases de todas las ramas presentes en la copa verde (GRT). Figura 1.b: relación entre la sección del fuste inmediatamente por debajo de un verticilo determinado dentro de la copa (GBV), y la sumatoria de la sección transversal de las bases de todas las ramas presentes por encima de la altura considerada (GRP).

En la tabla 1 se detallan las frecuencias observadas para la variable "cantidad de ramas por verticilo", la cual fue incorporada al modelo mediante una función de probabilidades discreta.

**Tabla 1.** Frecuencias relativas observadas para la cantidad de ramas primarias vivas por verticilo.

Cantidad de ramas por verticilo	Frecuencia relativa
1	0,35
2	0,38
3	0,18
4	0,07
$\geq 5$	0,02

Finalmente, se consolidó un modelo de simulación de la estructura de copa para individuos de *Pinus taeda*, que emplea como variables de entrada el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total (H) y la altura de comienzo de la copa (HCC), las cuales resultan fácilmente determinables a campo. El mismo incluye: las funciones ya presentadas, un algoritmo basado en cadenas de Markov, una función de forma del fuste y, por último, sendos algoritmos de simulación estocástica que permiten reflejar las fuentes de variación no controladas para las variables DV y cantidad de ramas por verticilo.

En las tablas 2 y 3 se presenta, a modo ilustrativo, el extracto de una simulación de estructura de copa para un árbol de 28 cm de DAP, 20,3 m de H y una longitud de copa de 9,3 m, donde la estructura de copa queda descrita por la longitud de la copa, la cantidad de verticilos presentes, la altura a la cual se presenta cada uno de los mismos, la sección del fuste en la base de cada verticilo, la sección agregada de todas las ramas del verticilo y el diámetro medio de las mismas. Se espera que las herramientas generadas contribuyan al desarrollo de metodologías que permitan determinar la calidad del fuste y planificar el trozado del mismo al considerar la cantidad y tamaño de los nudos. Asimismo, se destaca el aporte que podrían brindar para fines prácticos en la caracterización de rollizos para usos de apariencia y/o estructurales. Finalmente debe resaltarse la posibilidad de emplear estas herramientas con fines didácticos y comunicacionales.

**Tabla 2.** Extracto del modelo de simulación de estructura de copa para un ejemplar de *Pinus taeda*: variables de entrada y resumen de resultados.

Variables de entrada		Resumen de resultados	
Árbol N°	14	Longitud copa (m)	9,3
Densidad (N/ha)	600	Cantidad de verticilos	13
DAP (cm)	28,0	DV promedio (cm)	74,6
H total (m)	20,3	GBCV (cm <sup>2</sup> )	245,4
HCCV (m)	11,0	GR (cm <sup>2</sup> )	308,4

**Tabla 3.** Extracto del modelo de simulación de estructura de copa: síntesis de las principales variables representadas en el modelo para describir la copa de un individuo de *P. taeda* de las dimensiones descritas en la tabla 2.

Verticilo N°	Altura (m)	DV (m)	Sección fuste (cm <sup>2</sup> )	GR del verticilo (cm <sup>2</sup> )	Diámetro medio ramas (cm)
(Ápice)	20,3	0,43	0,0	0	0
17	19,6	0,71	10,4	15,0	3,29
16	18,9	0,56	28,6	15,6	4,21
...	...	...	...	...	...
3	12,4	0,77	205,2	10,9	1,87
2	11,7	0,74	225,2	19,3	2,86
1	11,0	-	245,5	19,6	2,50

## Bibliografía

- Fassola H., Crechi E., Barth S., Keller A., Pinazo M., Martiarena R., Von Wallis A.; Figueredo I. (2008). Relación entre la biomasa aérea y la sección transversal en la base de copa viva de *Pinus taeda* en el norte de la provincia de Misiones. XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM – EEA Montecarlo, INTA.Eldorado, Misiones, Argentina.
- Mäkinen H.; Mäkelä A. (2002). Predicting basal area of Scots pine branches. *Forest Ecology and Management* 179: 351–362
- Mäkinen H.; Song T. (2000). Evaluation of models for branch characteristics of Scots pine in Finland. *Forest Ecology and Management* 158: 25–39.
- Trincado G. (2006). Dynamic modeling of branches and knot formation in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) trees. Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University as requirements for the degree of PH in Forestry.
- Weiskittel A. R.; Seymour R. S.; Hofmeyer P. V.; Kershaw J. A. (2010). Modelling primary branch frequency and size for five conifer species in Maine, USA. *Forest Ecology and Management* 259: 1912–1921.
- Yapura P.; Sañudo G.; Fassola H.; Crechi E.; Keller A.; Caraballo H. (2016). Proyecto de Investigación Aplicada (PIA 10107): Optimización del trozado de fustes de pinos y eucaliptos cultivados en Misiones y Corrientes. En: C. Llavallol (Ed.), *Investigación forestal 2011-2015: los proyectos de investigación aplicada*, CABA: UCAR, pp. 371-374.