SIMULADOR DE ESTRUCTURA DE RAMAS

Para Pinus Taeda V. 1.0

SAÑUDO Gastón, YAPURA Pablo, KELLER Aldo, CRECHI Ernesto, FASSOLA Hugo, WINCK Angela, BARTH Sara, CARABALLO Horacio

INTA

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
Argentina

FCAyF

SIMULADOR DE ESTRUCTURA DE RAMAS

Versión 1.0 (Pinus taeda - Misiones)

Ing. Ftal. Gastón Sañudo[1]; Ing. Ftal. Pablo Yapura[1]; Ing. Ftal. Aldo Keller[2]; Ing. Ftal. MSc. Ernesto Crechi[2]; Ing. Ftal. MBA Hugo Fassola[2]; Ing. Ftal. MSc. Ángela Winck[2]; Ing. Ftal. Dra. Sara Barth[2]; Lic. Horacio Caraballo[1].

Contacto: gastonsaniudo@gmail.com; pyapura@gmail.com; keller.aldo@inta.gob.ar; crechi.ernesto@inta.gob.ar; fassola.hugo@inta.gob.ar; winck.rosa@inta.gob.ar; barth.sara@inta.gob.ar; caraballohoracio@gmail.com.

RESUMEN

Poder predecir la calidad y el valor de los productos forestales es muy deseado por la industria maderera. El precio final y la calidad de la madera están determinados en gran medida por los nudos y la longitud de los entrenudos. Para modelar el tamaño y la distribución de los nudos, así como la longitud de los entrenudos, se necesita una buena comprensión de la arquitectura de la corona. Para contribuir a este objetivo, se desarrollaron varios modelos para *Pinus taeda* en la provincia de Misiones.

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, branch architecture, simulation

[1]FCAyF UNLP;
[2]INTA EEA Montecarlo

INTRODUCCIÓN

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). En el ANEXO I se presenta una GUÍA DEL USUARIO.

MATERIALES Y MÉTODO

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 Aplications (VBA) y el empleo de planillas de cálculo.

El Modelo de simulación de estructura de copa para *Pinus taeda*permite estimar el tamaño y distribución de las ramas a lo largo del fuste, a partir de los datos del DAP, altura total y altura de la base de la copa viva de un árbol. Luego de cada simulación, la estructura de copa queda descripta por la longitud de la copa, la cantidad de verticilos presentes, la altura a la cual se presenta cada uno de los mismos (de donde se desprende la distancia entre verticilos), la sección del fuste en la base de cada verticilo y, para cada uno de ellos, la cantidad de ramas que lo conforman, la sección agregada de las mismas y su diámetro medio.

Las bases de datos empleadas provienen de ensayos de raleo de plantaciones de *Pinus taeda*, intensidades y oportunidad y de 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).

El simulador se estructuró en las relaciones observadas entre las secciones conductivas del fuste y las ramas. Las mismas fueron abordadas inicialmente en el marco de la "teoría de los conductos", y han sido empleadas actualmente por muchos investigadores (Mäkinen y Mäkelä, 2002; Fassola *et. al.* 2008). A las relaciones entre secciones conductivas, se suman las funciones probabilísticas

sendos algoritmos de simulación estocástica que permiten considerar las fuentes de variación no controladas para la distribución de los verticilos y la cantidad de ramas presentes en cada uno de ellos. Finalmente este conjunto de funciones se articula con un modelo de forma del fuste ("forma-volumen compatible") (Sañudo *et. al.* 2014), empleando un algoritmo basado en cadenas markovianas, lográndose la implementación operativa del modelo mediante planillas de cálculos y el lenguaje de programación BBA.

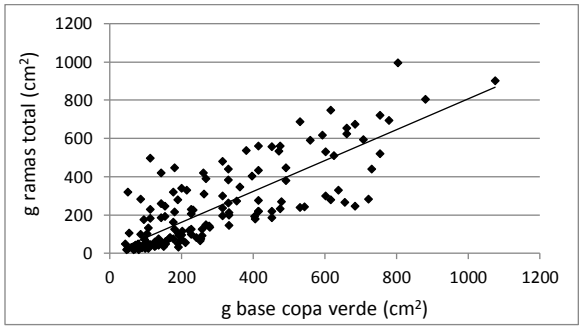
RESULTADOS

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.

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

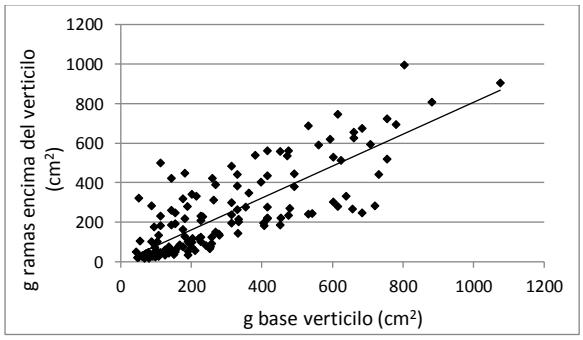
Donde, P es la probabilidad relativa acumulada, y el dominio del modelo se restringe al siguiente rango: 0<DV<1,8.

Figura 1.a. Relación entre la sección del fuste en la ase de la copa viva (GBCV) y la sección de las ramas vivas comprendidas en la totalidad de la copa verde (GRT).



$$GRT = 0{,}822\,.\,GBCV \quad (R^2 = 0{,}769)$$

Figura 1.b. Relación entre la sección del fuste en la base de un determinado verticilo (GBV) y la sección de las ramas vivas presentes por encima de la sección del fuste considerada (GRP).



$$GRP = 0{,}83\,.\,GBV \quad (R^2 = 0{,}756)$$

Se representa con puntos la dispersión de las variables y con trazo continuo la recta de regresión. Al pie de cada grafico 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
≥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 descripta 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 Nº	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^2)**	245,4
HCCV (m)	11,0	**GR (cm^2)**	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 descriptas en la tabla 2.

Verticilo Nº	Altura (m)	DV (m)	Sección fuste (cm^2)	GR del verticilo (cm^2)	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 y 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 and Song T. 2000. Evaluation of models for branch characteristics of Scots pine in Finland. Forest Ecology and Management 158 (2002) 25–39.

Mäkinen Harri and Annikki Mäkelä. 2002. Predicting basal area of Scots pine branches. Forest Ecology and Management 179 (2003) 351–362

Trincado Guillermo. 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.

Sañudo G., Caraballo H., Gonzalez C. Z., Yapura P. y Altamirano R. 2014. Ajuste de funciones de forma del fuste para especies arbóreas maderables y cálculo del volumen de madera rolliza. XVIII Congreso Nacional y X Congreso Internacional EMCI 2014 (Encuentro Nacional sobre Enseñanza de Matemática en carreras de Ingeniería). Pág. 41-46, Sección Aplicaciones de la Matemática. Mar del Plata, Argentina. ISBN: 978-987-544-565-9.

Sañudo, G.; Yapura, P.; Fassola, H. E.; Winck, R. A.; Barth, S.; Crechi, E. H; Keller, A. E. y Caraballo, H. 2019. Modelos de estructura de ramas para Pinus taeda: contribución al desarrollo de herramientas que permitan evaluar la calidad del fuste y planificar su trozado. Acta de Conferencias y Resúmenes. XVIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF UNaM-INTA EEA Montecarlo. Eldorado. PP486-488

Weiskittel Aaron R., Seymour Robert S., Hofmeyer Philip V. & Kershaw John A. 2010. Modelling primary branch frequency and size for five conifer species in Maine, USA. Forest Ecology and Management 259 (2010) 1912–1921.

Yapura P, Sañudo G, Fassola H, Crechi E, Keller A y H Caraballo. 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.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a DIPROSE por el financiamiento de los proyectos que contribuyeron al desarrollo de este simulador. A las empresas Taeda SA, Lipsia SA, Puerto Laharrague; Ing. De Coulon, Papel Misionero y Bosques del Plata por su apoyo y contribución material en la ejecución de los trabajos de campo. Como también al personal de apoyo de la EEA Montecarlo.

ANEXO I

GUÍA DEL USUARIO

Instrucciones

*** El sistema permite modelar árboles de hasta 35 m de altura y copas de hasta 20 m de longitud.**

**** En caso de visualizar alguna celda en color rojo, deberá revisar el dato ingresado en la misma.**

1- Como primer paso, una vez abierto el programa, recuerde habilitar o permitir el uso de macros

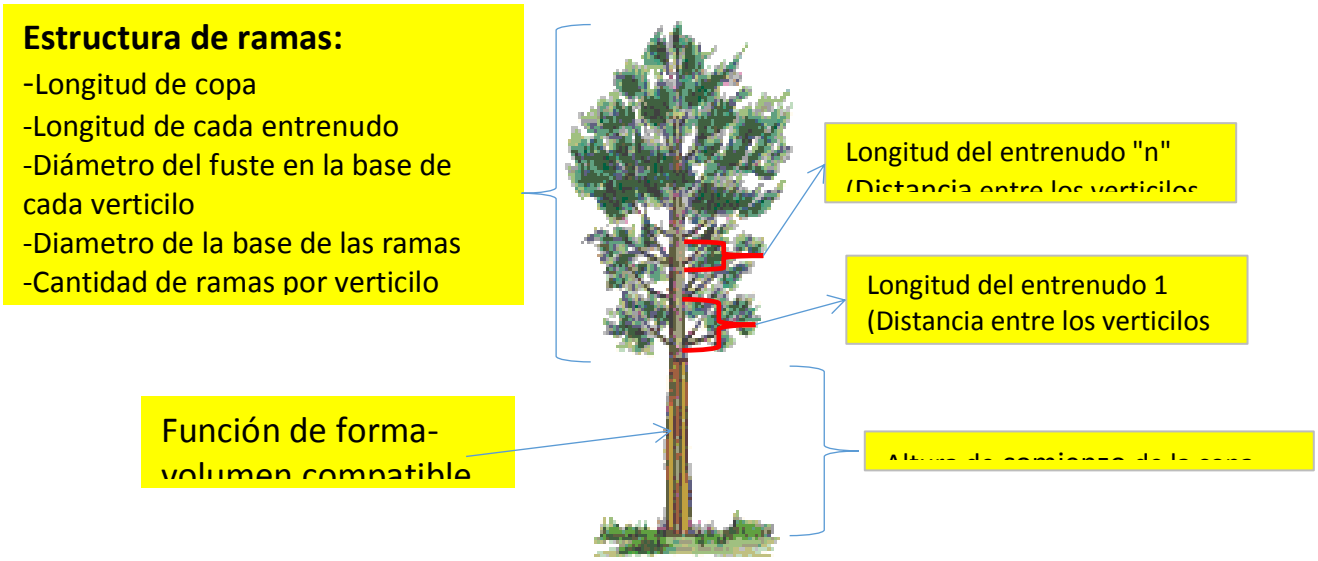
2- Diríjase a la hoja "Modelo de simulación de copa" e ingrese las Variables de entrada DAP, H y HBCV (ver "Definición de las variables"). Si no conoce la HBCV, puede estimarla ingresando la Densidad del rodal. Observará el valor estimado en la celda C15 y deberá copiarlo en la celda correspondiente a la HBCV.

3- Para correr la simulación, presione el botón "Simular" ubicado al pie de la ventana para ingreso de datos.

4- Para un mismo conjunto de valores de las 3 variables de entrada, puede realizar tantas simulaciones como desee, presionando sucesivamente el botón "Simular". De este modo obtendrá la representación, para un individuos de las mismas dimensiones de H, DAP y HBCV, un conjunto de estructuras de copa diferentes, las cuales diferirán unas de otras en cierta medida, de forma coherente con los modelos probabilísticos empleados, los cuales recogen las fuentes de variación no controladas (componentes aleatorias del modelo).

5- Si desea recopilar los resultados de varias simulaciones, puede copiar las tablas generadas en cada simulación y pegarlas en una nueva hoja mediante el comando "pegar sólo valores"

6-Para realizar simulaciones con otros valores de DAP, H y HBCV, modifique el valor de las variables de entrada y presione el botón "Simular".



Definición de las variables

d: es el diámetro del fuste a una altura determinada (cm). Se estimada mediante el modelo de forma de Sharma (forma-volumen compatible).

DAP: diámetro del fuste a la altura del pecho (cm)

H: altura total del fuste (m)

h: altura (m)

HBCV: altura de la base de la copa viva (altura del primer verticilo). Debe determinarse a campo, o calcularse como la diferencia entre la H del árbol y la estimación de la longitud de la copa, obtenida mediante el modelo suministrado [6], en función de la H del árbol y la densidad del rodal. El valor estimado puede visualizarse en la celda C13 de la hoja "Modelo de simulación de copa" [8]. (Su valor a campo depende de la cantidad e intensidad de podas y de la dinámica del rodal y del individuo en relación al desrame natural).

g: sección transversal del fuste a 1,30 metros de altura

gbcv: sección transversal del fuste a la altura del comienzo de la copa viva

gbv: sección transversal del fuste a la altura de la base de un verticilo determinado

$\mathbf{g_{ramas(g)}}$**:** sección transversal (agregada) de la base de las ramas de toda la copa, en función de g

$\mathbf{g_{ramas(gbcv)}}$**:** sección transversal (agregada) de la base de las ramas de toda la copa, en función de gbcv

$\mathbf{g_{ramas.parcial(gbv)}}$**:** sección transversal (agregada) de la base de las ramas comprendidas entre el ápice y el verticilo considerado, en función del gbv

$g_{\text{ramas del verticilo}}$: sumatoria de la sección transversal de la base de las ramas que integran un verticilo dado.

LE: longitud de entrenudos o longitud entre verticilos. Variable discreta, comprendida entre 2 y 20 dm, con intervalos de 1 dm. Es definida como la distancia vertical que separa la base de dos verticilos consecutivos determinados, medida a lo largo del eje longitudinal de fuste. Tener en cuenta que un porcentaje de esta longitud estará ocupada por una porción de los nudos y su zona de influencia.

$\text{Prob.ac}_{(LE)}$: probabilidad acumulada para la variable LE. Válida para valores de LE comprendidos entre 0,2 m y 2 m, debiéndose ingresar los valores de LE en decímetros.

LC: longitud de la copa

Densidad: cantidad de individuos por hectárea

CR: cantidad de ramas presentes en un verticilo. Variable discreta comprendida entre 1 y 5, con intervalos de una unidad

Funciones

[1] - Función de forma-volumen compatible (Modelo de Sharma). (Sañudo *et.al.*, 2014).

$$d = \sqrt{DAP^2 \times \left(\frac{h}{1{,}30}\right)^{(2-2{,}0881)} \times \frac{H-h}{H-1{,}30}}$$

[2] - Relación gfuste-gramas (Sañudo et.al., 2014).

$$g_{ramas\,(g)} = 0{,}3698 \times g$$

[3] - Relación gbcv-gramas (total). (Sañudo et.al., 2014)

$$g_{ramas(gbcv)} = 0{,}822 \times gbcv$$

[4] - Relación g base verticilo-gramas (parcial). (Sañudo et.al., 2014)

$$g_{ramas.parcial(gbv)} = 0{,}818 \times gbv$$

[5] - Probabilidad acumulada (Distribución de frecuencias relativas) para las longitudes de internodios (LI).
Implementado mediante cadenas markovianas. Publicado en Jotefa 2019

$$\text{Prob.ac}_{(LI)} = 0{,}815 \times LI^{6} - 5{,}597 \times LI^{5} + 14{,}91 \times LI^{4} - 19{,}06 \times LI^{3} + 11{,}11 \times LI^{2} - 1{,}312 \times LI + 0{,}026$$

[6] - Longitud de copa (informe final PIA 14072-DIPROSA, 2018)

$$LC = \frac{H \times 251{,}2 \times \text{Densidad}^{-0{,}29}}{100}$$

[7] - Distribucion de frecuencias (acumulada) para la variable "Cantidad de ramas por verticilo" ((informe final PIA 14072-DIPROSE, 2018))

$$\text{Frec.Ac.}_{(CR)} = -0{,}047 \times CR^2 + 0{,}482 \times CR - 0{,}235$$