

Actas del VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino

27 al 30 de marzo de 2023
Ciudad de Mendoza



Organizadores





Actas del VIII Congreso Forestal latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino

Pablo Luis Peri ... [et al.]. - 1a ed., 2023.

Libro digital, PDF

Editores: Peri P.L.; Mundo I.; Lencinas M.V.; Goya J.; Mastrandrea C.; Colcombet L.

Diagramación; y diseño de carátula e interiores: María José Ledesma Cecot y Rodolfo Morone

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-46815-7-7

1. Recursos Forestales. 2. Ecología Forestal. 3. Genética. I. Peri, Pablo Luis.
CDD 577.3

Herramientas para la estimación del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus dunnii* (Maiden) en el N de la Región Pampeana

Paula Ferrere¹, Dino Palazzini², Ana María Lupi³, Pablo Pathauer⁴

Palabras claves: *Eucalyptus*, manejo forestal, modelos

Introducción

En Argentina, el género *Eucalyptus* con 200.000 hectáreas, ocupa el segundo lugar en cuanto a superficie total cultivada. Si bien *Eucalyptus grandis* W. Hill es la especie predominante en cuanto a superficie cultivada a nivel nacional debido a su alta productividad y rectitud de fuste, presenta características como la susceptibilidad a las heladas y restricciones en suelos con problemas de drenaje que limita su expansión a áreas extra mesopotámicas. *Eucalyptus dunnii* es una especie cuya área de cultivo abarca la Mesopotamia y parte de la región pampeana. Particularmente en esta región corresponde a la especie de mayor interés por su tolerancia a heladas, adaptabilidad a suelos con ciertas limitantes en el drenaje interno, buenos crecimientos y rendimientos con la genética actualmente disponible. Además, esta especie es la materia prima por excelencia de la industria forestal con destino a triturado para celulosa y tableros localizada en el NE de Buenos Aires y SE de Santa Fe (Gea, 1986).

La demanda de herramientas de apoyo para la planificación y la toma de decisiones del sector forestal pampeano, en expansión, plantea la necesidad de generar modelos que permitan una adecuada estimación de diferentes parámetros a nivel de rodal para *E. dunnii*. Para la región N de Buenos Aires y SE de Entre Ríos no se dispone de estas herramientas. Puede mencionarse trabajos como los realizados por Barth et al. (2000), en Misiones y más recientemente las estimaciones de crecimiento realizadas por Achinelli et al. (2017) en el norte de la depresión del Salado, Buenos Aires.

El área basal (G) es una variable empleada en silvicultura para evaluar el grado de ocupación del rodal y está altamente correlacionado con el volumen a nivel de rodal, la edad y el índice de sitio (Burkhart &

Tomé, 2012). Pienaar & Shiver (1986) indican que los estudios de espaciamiento a largo plazo han demostrado que el área basal aumenta asintóticamente con la edad, y la asíntota depende de la calidad del sitio y la densidad del rodal.

A partir de este vacío de información se planteó como objetivo ajustar ecuaciones para la estimación de volumen, la altura dominante y el área basal presente, para *Eucalyptus dunnii*, en la zona N de la provincia de Buenos Aires y el SE de Entre Ríos.

Materiales y Métodos

Se realizaron mediciones sobre 26 plantaciones operativas de *E. dunnii*, localizados en el centro norte de la provincia de Buenos Aires y sudeste de Entre Ríos. Los sitios de muestreo incluyen plantaciones, establecidas en un amplio rango de condiciones edáficas en cercanías de las localidades de Carlos Keen, Jáuregui, Castilla, Carmen de Areco, Ramallo, Zarate-Delta (Buenos Aires) y Gualeguaychú (Entre Ríos). Las plantaciones relevadas están distribuidas en edades que van desde los 3 a los 13 años. En cada rodal se instalaron 3-4 parcelas de muestreo rectangulares, temporarias, de una superficie de 400 m². Se midieron todas las circunferencias a la altura del pecho (CAP), la altura total (h) y la altura de la copa verde de 6 individuos por parcela (4 del CAP máximo, 1 del medio y 1 mínimo). Las mediciones de CAP se realizaron con una cinta métrica estándar y las de altura con un clinómetro Suunto/hipsómetro Vertex. Para la estimación del volumen de cada árbol se empleó la ecuación de Ferrere et al. (2022). Se ajustaron modelos no lineales de estimación de altura dominante (H), área basal presente (G) y volumen con corteza presente (V) (Cuadro 1), de uso más difundido en la bibliografía (Hall et al. 2020; Barth et al, 2000) y probadas para especies del género *Eucalyptus*.

1 AER 9 de Julio, EEA Pergamino. Contacto: ferrere.paula@inta.gob.ar.

2 Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP; Instituto de Recursos Biológicos, CIRN, INTA Castelar. Contacto: palazzini.dino@inta.gob.ar.

3 Instituto de Suelos, CIRN, INTA Castelar. Contacto: lupi.ana@inta.gob.ar

4 Instituto de Recursos Biológicos, CIRN, INTA Castelar. Contacto: pathauer.pablo@inta.gob.ar.

Cuadro 1. Modelos ajustados de H (altura dominante), G (Area basal) y V (Volumen).

Variable predicha	Modelo
H	$H = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-aE}} + \varepsilon$ (1)
H	$H = \beta_0 (e^{-\beta_1 e^{-aE}}) + \varepsilon$ (2)
H	$H = \beta_0 (e^{-\beta_1 E})$ (3)
H	$H = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 e^{-aE}}) + \varepsilon$ (4)
G	$\ln G = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{1}{E}\right) + \beta_2 \frac{H}{E} + \varepsilon$ (5)
G	$\ln G = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{1}{E}\right) + \beta_2 H + \beta_3 FE + \varepsilon$ (6)
G	$\ln G = \beta_0 + \beta_1 * \left(\frac{1}{E}\right) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 N + \varepsilon$ (7)
V	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 (G) + \varepsilon$ (8)
V	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 (G) + \beta_2 (H) + \varepsilon$ (9)
V	$\ln V = \beta_0 + \beta_1 (G) + \beta_2 (H) + \beta_3 (E) + \varepsilon$ (10)

Donde $\beta_0, \beta_1, \beta_2$: parámetros de la ecuación, E: edad del rodal (años), H: altura dominante (m), $FE = \frac{\sqrt{\frac{10000}{G}}}{H}$ (%), N: árboles por hectárea, G: área basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$).

El volumen a cualquier edad se describe típicamente como una función a partir de variables que reflejen la calidad del sitio (H) y la densidad (G, N).

La evaluación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza (homocedasticidad) se realizó mediante el análisis gráfico de los residuos de cada modelo. Se empleó el gráfico cuantil-cuantil (Q-Q plot), usando como distribución teórica la normal y un gráfico de residuos vs valores estimados (Myers 1990). La evaluación de la bondad de ajuste de los modelos se basó en el AIK (criterio de información de Akaike), BIC (criterio de información Bayesiano) y la raíz del cuadrado medio del error (RCME). Se busca que AIC, BIC y RCME presenten el menor valor posible y que emplee menos parámetros. BIC busca el modelo más abstracto, más sencillo y que hace predicciones en un contexto más amplio. Por su parte, AIC dará con un modelo más complejo y pragmático

que hace predicciones con mayor detalle dentro de los datos empleados. Además, se tuvo en cuenta la significancia de los parámetros ($\alpha=0,05$) y el número de parámetros del modelo (principio de simplicidad). Se calculó la media de los valores absolutos de los residuos (MAR, E) (Dorado y Gonzalez, 2000). Los análisis estadísticos se realizaron con Infostat 2011 (Di Rienzo et al., 2008).

Resultados

En el análisis gráfico de los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza no se detectaron evidencias que hicieran suponer un incumplimiento de los mismos. En el caso de la altura dominante, los modelos (1) y (4) fueron descartados porque los parámetros no resultaron significativos. Las diferencias observadas en los estadísticos de bondad de ajuste entre los modelos resultaron mínimas, siendo el modelo 2 levemente superior al 3. Para los modelos considerados, la RCME para el modelo seleccionado fue de 2,76 y la MAR 2,22. Los valores de AIK y BIC fueron los más bajos entre los modelos considerados (Cuadro 2). Para la estimación del G del modelo elegido un RCME de 4,69, mientras que la MAR fue 3,29. Si bien el modelo que se destacó por sus valores estadísticos fue el 6, no fue seleccionado porque el parámetro que afecta la H no fue significativo. Considerando la gran amplitud de calidades de sitios muestreados y siendo la H un reflejo de dicha calidad se considera importante la incorporación de esta variable en el modelo. El modelo 7 que incluye H, la edad y la densidad fue seleccionado para realizar las estimaciones. Los valores de AIK y BIC fueron de 473,06 y 484,90 respectivamente. Para el volumen, el modelo 9 presentó el menor RCME (47,5), mientras que la MAR fue de 31,6, que considera el G y H como variables independientes.

Cuadro 2. Parámetros de las ecuaciones para estimar altura dominante, área basal presente y volumen presente en rodales de E. dunnii.

Mod.	Y	β_1	β_2	β_3	β_4	AIK	BIC	RMSE	Mar	$p(\beta_1)$	$p(\beta_2)$	$p(\beta_3)$	$p(\beta_4)$
1)	H	2,54222	-1,60903	-0,04021		463,73	473,2	2,82	2,2588427	0,7443	0,5838	0,4572	
2)	H	35,4429	9,36552	0,43786		388,38	397,9	2,76	2,2229984	<0,0001	<0,0001	<0,0001	
3)	H	11,12814	0,09523			450,8	457,9	4,27	3,54835941	<0,001	<0,001		
4)	H	3,51708	-2,37241	-0,10985		457,31	466,8	2,95	2,38908816	0,705	0,7764	0,0279	
5)	G	3,97767	-7,42744	0,13916		492,66	502,1	5,34	3,77780326	<0,001	<0,001	<0,001	
6)	G	3,52954	-2,72162	0,24702	-3,838	471,55	483,4	4,65	3,22170524	<0,001	<0,001	0,241	<0,001
7)	G	0,9365	-2,8773	0,8078	0,0003	473,06	484,9	4,69	3,29298255	0,1503	<0,001	<0,001	<0,001
8)	V	4,14933	0,04792			897,44	904,6	164	108,828554	<0,001	<0,001		
9)	V	3,69042	0,03262	0,03579		838,01	847,5	47,5	31,6140959	<0,001	<0,001	<0,001	
10)	V	3,79574	0,02498	0,02037	0,0663	807,08	818,9	168	111,673191	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Y: variable estimada, H: altura dominante (m), G: área basal del rodal ($m^2 \cdot ha^{-1}$), V volumen del rodal ($m^3 \cdot ha^{-1}$); a, b y c: parámetros estimados. R^2 : coeficiente de determinación ajustado; RMSE: raíz del cuadrado medio del error, E: MAR: media de los valores absolutos de los residuos. $p(\beta_1), p(\beta_2), p(\beta_3), p(\beta_4)$ p-value de los parámetros de las ecuaciones

Discusión y conclusiones

Se ajustó un modelo de tipo exponencial para estimar la altura dominante (H) de *Eucalyptus dunnii* en contraposición con lo reportado por Barth et al. (2017), quienes emplearon el modelo de Chapman Richard, para la misma especie en el NE de Argentina. El mejor ajuste del modelo exponencial en el presente estudio posiblemente pueda deberse al empleo de rodales jóvenes, de hasta 13 años de edad. También se ajustaron ecuaciones de área basal presente (G) y volumen con corteza presente (V) en el N de la provincia de Buenos Aires y SE de Entre Ríos, en un rango de edad que corresponde al ciclo forestal de la especie en la región en estudio.

Los modelos recomendados para cada indicador son:

$$H = 35.4429(e^{-9.36552 * e^{-(0.43786 * E)}})$$

$$\ln G = 0.9365 - 2.773 * \left(\frac{1}{E}\right) + 0.8078 * \ln \ln(H) + 0.0003 * N$$

$$\ln V = 3.69042 + 0.03262(G) + 0.03579(H)$$

La construcción de modelos con datos locales permite contar con herramientas de planificación que posibilitan estimar las existencias de rodales en pie y resultan insumos fundamentales para la realización de análisis económico financieros, de alta demanda en la provincia de Buenos Aires. Sería necesario desarrollar ecuaciones de índice de sitio y para ello es recomendable ampliar la base de datos considerando mayor número de sitios y edades más avanzadas.

Agradecimientos

A T. Pisetta y G. Galasso del IRB (CIRN, INTA Castelar) por el apoyo en las tareas de campo. A las empresas Coldridge SA, Daglom SA, Fiplasto SA, Arauco Argentina SA, Establecimientos La Negra SA y El Potrero de San Lorenzo SA. Trabajo financiado parcialmente por los proyectos PEI016, PE146.

Bibliografía

Achinelli FG, Galarco S, Pérez F, Ciocchini RG, González A; Donna F. 2017. Crecimiento de *Eucalyptus dunnii* Maiden en el noreste de la Pampa Deprimida de Buenos Aires. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos (Concordia, 2017).
Barth SR, Fassola HE, Ferrere P, Allegranza D; Pahr N. 2002. Modelos de crecimiento y producción de *Eucalyptus dunnii* (Maiden) en la zona de Garuhapé, Misiones. Décimas Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales - Facultad de Ciencias Forestales -UNaM- EEA Montecarlo -INTA-Eldorado,Misiones,

Argentina

Burkhardt, H.E., and M Tomé. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer Science Business Media, Dordrecht

Di Rienzo J; Casanoves F; Balzarini M; Gonzales L; Tablada M; Robledo C. 2008. InfoStat Versión 2011.

Dorado FC; Gonzales, JA. 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Forest Systems, 9(2), 253-268.

Ferrere P; Palazzini D; Lupi AM; Pathauer P. 2022. Ecuaciones para la estimación de la altura y el volumen en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* en el norte de la región pampeana. XXXVI Jornadas Forestales Entre Ríos. Concordia, Octubre 2022. 6p.

Gea L. 1986. Revisión de ensayos de *Eucalyptus* spp. en Buenos Aires y Santa Fe. Seminario CIEF del 23/06/1986. Informe Interno (inédito). Centro de Investigaciones y Experiencias Forestales. Buenos Aires, Argentina, 33 pp.

Hall KB, Stape JL, Bullock BP, Frederick D, Wright J, Scolforo HF, Cook R. 2020. A Growth and Yield Model for *Eucalyptus benthamii* in the Southeastern United States For. Sci. 66(1):25-37

Pienaar LV, Shiver BD. 1986. Basal area prediction and projection equations for pine plantations. For. Sci. 32(3): 626-633.

Myers RH. 1990. Classical and modern regression with applications, 2, 488 pags. Belmont, CA: Duxbury press.