

## Sistema de ecuaciones de producción y crecimiento de *Pinus taeda* L. con variables asociadas a las podas

R. Costas\*, S. Korth, S. Figueredo, E. Weber, P. Mac Donagh, A. Friedl, J. Heck y M. Alves do Porto

Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Misiones. Argentina

### Resumen

Se ajustaron modelos de producción y de proyección del crecimiento de rodal completo, que forman un sistema de ecuaciones compatibles entre sí, incluyendo variables regresoras asociadas con la intensidad de podas, además de la edad, la densidad y el índice de sitio. Se utilizaron datos de un ensayo de *Pinus taeda* L., con edades entre 4 y 9 años. Las variables respuestas analizadas fueron el área basimétrica y el volumen por hectárea. Para ambas variables se obtuvieron modelos que predicen menores valores de producción y crecimiento juvenil al intensificarse el régimen de poda, más precisas y con calidades de ajuste levemente mejores que ecuaciones de excelentes comportamientos estadísticos y sin variables vinculadas con las podas. Utilizando las funciones predictivas del área basimétrica se obtuvieron resultados sensibles a las podas respecto del diámetro medio cuadrático.

Las funciones obtenidas pueden ser usadas como herramientas de cálculo para decidir cuánto y cuándo podar ramas fotosintéticamente activas de acuerdo a los objetivos de producción. Estos modelos son promisorios para el desarrollo de nuevos programas de simulación de producción y crecimiento regionales de *Pinus taeda* que contemplen a las podas realizadas en los sistemas de producción intensivos.

**Palabras clave:** modelos, área basimétrica, volumen por hectárea, índice de sitio, densidad, proporción de copa media.

### Abstract

#### System of equations for yield and growth of *Pinus taeda* including prune variables

It were adjusted stand yield functions and dynamic growth models, that compose a compatible system of equations, that include regressors variables associated with prune intensity, beside age, stand density and site index. The data set come from a trial in a *Pinus taeda* L. plantation, with ages between 4 and 9 years. The response variables analyzed were basal area and volume per hectare. For both variables the models obtained produced lower production and young growth values when the prunes were intensified. Also, it were obtained more precision and a slightly better adjusted quality than equations with excellent statistic behavior without prune variables. The utilization of predictive area basal functions allows to obtain results for quadratic mean diameter according to prune intensity.

These functions could be easy employed as a tool to decide when and how much of green branches prune in relation with the production objective. The obtained models appear interesting to develop new regional growth simulation programs of *Pinus taeda* that include prunes applied in intensive silvicultural systems of forest production.

**Key words:** models, basal area, volume per hectare, site index, density, average crown ratio.

### Introducción

La producción y el crecimiento de una masa forestal coetánea son predecibles a través de modelos matemáticos. Las variables predictoras más usadas suelen ser la edad, la densidad y la calidad de sitio expresada a través del índice de sitio o la altura domi-

nante a una edad determinada. Esos modelos fueron tratados por Alder (1980), Avery y Burkhart (1994), Sanquetta (1996), Prodan *et al.* (1997), Crechi *et al.* (1998) y Crechi *et al.* (1999) entre otros autores.

En la provincia de Misiones y nordeste de Corrientes, Argentina, desde principios de la década del 90 se han difundido e implementado sistemas de manejos silvícolas intensivos de plantaciones de coníferas. El control de la densidad y realización de podas para optimizar la cantidad y calidad de la producción forestal, han

\* Autor para la correspondencia: [rcostas@facfor.unam.edu.ar](mailto:rcostas@facfor.unam.edu.ar)  
Recibido: 13-07-06; Aceptado: 17-05-07.

mostrado ser herramientas eficaces para satisfacer las demandas del mercado local e internacional.

La poda de ramas vivas reduce el área fotosintética de la copa de los árboles, produciendo reducción del crecimiento de los mismos. Evans (1992), Seitz (1995) y Costas *et al.* (2005b) citaron experiencias realizadas con *Pinus* y Muñoz *et al.* (2005) con *Eucalyptus nitens*, en las cuales observaron que a mayor proporción de copa extraída, la disminución del crecimiento fue más drástica. Meneses y Guzmán (2000), al analizar una muestra de 30 rodales de *Pinus radiata* con distinta historia de raleos y podas, señalan que podas muy severas influyen negativamente sobre el crecimiento diamétrico hasta la edad de cosecha y que el éxito de las podas depende de la calidad de sitio y de la oportunidad e intensidad de las mismas.

Existen modelos de crecimiento diamétrico de árboles individuales como los desarrollados por Burkhart *et al.* (2001) y Burkhart *et al.* (2003) que contienen entre sus variables regresoras a la proporción de longitud de copa viva respecto de la altura total del árbol ( $cr$ ). Las funciones presentadas en esos trabajos indican que con el aumento de  $cr$  se incrementa el crecimiento del diámetro a la altura de pecho ( $dap$ ), reflejando el mayor potencial de fotosíntesis que tienen plantas con mayor proporción de longitud de copa respecto de la altura del árbol.

Keller *et al.* (2004) y Costas *et al.* (2005a) desarrollaron funciones de producción de rodal completo de *P. taeda* en Misiones, Argentina, clasificadas según intensidades de poda y utilizando al número de árboles por hectárea como covariable presente en las ecuaciones seleccionadas. Los primeros ajustaron la función de Chapman-Richards y encontraron disminuciones de producción de área basimétrica ( $AB$ ) y volumen por hectárea ( $V$ ) al intensificarse la altura de poda. Costas *et al.* (2005a) ajustaron funciones exponenciales predictoras de  $AB$ , del diámetro medio cuadrático ( $Dg$ ) y de  $V$  entre 5 y 8 años, clasificados en 4 clases de proporción de copa media ( $CR$ ). La producción predicha de esas variables respuestas a los 8 años se incrementa en 9,88; 4,97 y 11,43 % respectivamente por cada 10 % de aumento de  $CR$ . Costas *et al.* (2006), al comparar modelos de producción estáticos de rodal completo utilizando funciones lineales con y sin variables asociadas a las podas, encontraron que las primeras, además su sensibilidad a la podas practicadas, tuvieron mejores calidad de ajuste y capacidad predictiva.

García (1993) mencionó que ante la posibilidad de la reducción del crecimiento juvenil debido a las po-

das, al modelar el crecimiento resulta útil tomar alguna variable que refleje el grado de cobertura de la canopia afectada por las mismas. También enfatizó sobre las desventajas de la utilización de modelos de árboles individuales para predecir el crecimiento de masas forestales.

La combinación de factores biométricos y económicos relacionados con el costo de la realización de podas y la ganancia en valor de la producción por efectos de las mismas, justifican la investigación sobre modelos que reflejen su influencia sobre la producción de plantaciones de coníferas en el nordeste argentino. Los antecedentes señalan que la realización de podas resulta onerosa, con una incidencia entre 10 y 20% respecto del costo total de actividades realizadas en plantaciones locales de *P. taeda* hasta el momento de cosecha. Durante el trienio 2003-2005, en la zona norte de Misiones, Argentina, el precio de trozas de esta especie con podas tempranas fue entre 20 y 40 % superior al precio de trozas sin podas para categorías similares de punta fina.

El desarrollo de modelos «sensibles» a las podas sería de gran utilidad en la planificación y en la gestión forestal. Esas funciones deberían ser biológicamente razonables (Huang *et al.*, 2003) y más eficientes que las disponibles para esta especie en la región, que predicen la producción en función únicamente de la edad, la densidad y la calidad de sitio. Basados en la hipótesis que la incorporación de variables asociadas a las podas producen mejoras estadísticas en la predicción de la producción y el crecimiento, este trabajo tiene los siguientes objetivos:

— Generar modelos de producción dinámicos de rodal completo, que tengan entre sus variables predictoras a las relacionadas con la intensidad de podas, para edades entre cuatro y nueve años.

— Evaluar y analizar la mejora en calidad de ajuste y capacidad de predicción de dichos modelos respecto de funciones sin variables independientes vinculadas con las podas.

## Material y Métodos

El material experimental es un ensayo desarrollado en una masa regular de *P. taeda* origen Marion, implantada en 1996 en la localidad de Garuhapé-mí, Departamento Libertador Gral. San Martín, Misiones. La superficie total del ensayo es de 19.080 m<sup>2</sup>, instalado sobre un suelo correspondiente a un Kandiuult típi-

co (Soil Survey Staff, 1991). El ensayo fue homogéneo respecto del material genético y los tratamientos culturales realizados hasta el tercer año de edad.

En el ensayo se combinaron de manera factorial cuatro alturas finales de poda, tres niveles diferentes de número de levantes de poda y tres densidades manejadas con raleos por lo bajo. El criterio adoptado para la realización de las podas en cada oportunidad fue el de altura de poda homogénea en todos los árboles de cada unidad experimental (Seitz, 1995). La estructu-

ra de tratamientos aplicados se muestra en la Tabla 1. Cada una de las 36 combinaciones de densidad y tratamientos de poda tuvo dos repeticiones. En todas los casos fueron podadas ramas vivas, excepto en la última poda efectuada en las parcelas con mayor densidad donde se aplicó el tratamiento de poda 12, donde aproximadamente el 50% de las ramas eliminadas estaban muertas. Al ser podadas ramas basales, se puede asumir que en general las mismas estaban en la proporción sombreada de la copa (Assmann, 1970).

**Tabla 1.** Estructura de tratamientos de densidad y de poda

Densidad (*)	Número de levantes de poda	Altura de poda			Tratamiento de poda
		año 4 (m)	año 5 (m)	año 6 (m)	
D1 <sub>4</sub> = 567 D1 <sub>5</sub> = 525 D1 <sub>6</sub> = 499 D1 <sub>7</sub> = 400 D1 <sub>8</sub> = 400 D1 <sub>9</sub> = 400	2	3,30	3,30	3,30	1
	3	2,60	3,30	3,30	2
	4	2,37	2,83	3,30	3
	2	4,40	4,40	4,40	4
	3	3,15	4,40	4,40	5
	4	2,73	3,56	4,40	6
	2	1,80	5,50	5,50	7
	3	3,70	3,70	5,50	8
	4	3,10	4,30	5,50	9
	2	1,80	6,60	6,60	10
	3	4,25	4,25	6,60	11
	4	3,47	5,03	6,60	12
D2 <sub>4</sub> = 810 D2 <sub>5</sub> = 760 D2 <sub>6</sub> = 760 D2 <sub>7</sub> = 700 D2 <sub>8</sub> = 700 D2 <sub>9</sub> = 700	2	3,30	3,30	3,30	1
	3	2,60	3,30	3,30	2
	4	2,37	2,83	3,30	3
	2	4,40	4,40	4,40	4
	3	3,15	4,40	4,40	5
	4	2,73	3,56	4,40	6
	2	1,80	5,50	5,50	7
	3	3,70	3,70	5,50	8
	4	3,10	4,30	5,50	9
	2	1,80	6,60	6,60	10
	3	4,25	4,25	6,60	11
	4	3,47	5,03	6,60	12
D3 <sub>4</sub> = 1.691 D3 <sub>5</sub> = 1.480 D3 <sub>6</sub> = 1.307 D3 <sub>7</sub> = 1.000 D3 <sub>8</sub> = 1.000 D3 <sub>9</sub> = 1.000	2	3,30	3,30	3,30	1
	3	2,60	3,30	3,30	2
	4	2,37	2,83	3,30	3
	2	4,40	4,40	4,40	4
	3	3,15	4,40	4,40	5
	4	2,73	3,56	4,40	6
	2	1,80	5,50	5,50	7
	3	3,70	3,70	5,50	8
	4	3,10	4,30	5,50	9
	2	1,80	6,60	6,60	10
	3	4,25	4,25	6,60	11
	4	3,47	5,03	6,60	12

\* D1<sub>4</sub>, D1<sub>5</sub>, ..., D3<sub>9</sub> = número de árboles por hectárea en cada nivel de densidad a cada edad.

Desde el 4.º hasta el 9.º año de edad se midieron los diámetros a la altura de pecho, las alturas de poda ( $hp$ ) y las alturas totales ( $ht$ ) de los árboles de todas las unidades experimentales. Con los datos de las mediciones y las funciones correspondientes se calcularon  $AB$ , número de árboles por hectárea ( $N$ ), volumen individual sin corteza y volumen total sin corteza por hectárea ( $V$ ). Para cada parcela se calculó la variable  $CR$ , promedio de los  $cr_i$ , que expresan la proporción de longitud de copa respecto de la altura total de cada árbol, obtenidos por medio de la ecuación  $cr_i = (ht_i - hp_i) / ht_i$ . Cada  $hp_i$  fue la altura de poda alcanzada por lo menos un año antes de cada medición. En la Tabla 2 se muestran estadísticos descriptivos de algunas variables silvícolas que caracterizan al ensayo.

Como se trata de un ensayo donde se asume que la calidad de sitio es homogénea, previo a la utilización del índice de sitio ( $S$ ) como variable independiente, se realizaron análisis exhaustivos de su comportamiento. El  $S$  fue obtenido utilizando las ecuaciones de índice de sitio regionales de *P. taeda* presentadas por Crechi *et al.* (1999), con cada par de valores de altura dominante (calculada como el promedio de alturas de los 200 árboles más gruesos por hectárea) y edad. Por un

lado la prueba F con un nivel de significación del 5%, indicó que no hubo diferencias significativas de las alturas dominantes entre los tratamientos aplicados en ninguno de los años de medición. Por otro lado, los gráficos de diagnóstico señalaron que en cada edad, los mayores  $AB$  y  $V$  se produjeron en las parcelas con mayor altura dominante. Finalmente se optó por utilizar al  $S$ , ya que refleja las diferencias microambientales presentes en el ensayo, debidas probablemente a la acción antrópica efectuada sobre la superficie del ensayo previo al establecimiento de la plantación. Dado que el  $S$  fue calculado con las ecuaciones de índice de sitio de Crechi *et al.* (1999), las funciones de producción y crecimiento resultantes podrían ser usadas de manera compatible con aquellas. El valor medio de  $S$  registrado en el ensayo fue 23,19 m, considerando una edad de referencia o base de 15 años.

Se generó una base de datos con las variables «exógenas», «endógenas» y «de respuesta» que entre otros, Prodan *et al.* (1997) y Borders (1989) consideraron necesarias para generar modelos de producción y crecimiento. Las variables endógenas y de respuesta fueron relacionadas entre sí, tomando en cuenta las edades en que se produjeron los resultados de cada una, para

**Tabla 2.** Promedios, máximos y mínimos observados de variables silvícolas en cada edad

Edad (años)	Parámetro	Dg (cm)	Hm (m)	Hd (m)	CR	AB (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
4	Promedio	10,51	7,21	7,99	0,74	8,48	24,23
	Mínimo	7,63	6,03	6,56	0,68	2,49	5,30
	Máximo	14,39	8,69	8,78	0,80	16,65	50,99
5	Promedio	13,72	9,21	9,94	0,66	14,12	53,13
	Mínimo	9,75	7,63	8,62	0,52	5,50	17,25
	Máximo	18,36	10,63	11,19	0,83	26,77	107,34
6	Promedio	16,69	11,05	11,66	0,62	18,12	78,56
	Mínimo	13,53	9,16	9,67	0,36	8,24	30,71
	Máximo	23,28	12,40	13,14	0,77	32,48	141,47
7	Promedio	19,55	12,54	13,32	0,60	20,25	99,77
	Mínimo	15,56	11,09	11,75	0,44	9,93	46,24
	Máximo	27,36	13,92	15,00	0,76	32,58	166,14
8	Promedio	21,43	14,23	15,01	0,61	24,04	132,55
	Mínimo	16,93	13,20	14,00	0,48	12,74	68,68
	Máximo	31,16	15,98	16,49	0,70	37,03	213,11
9	Promedio	22,85	15,51	17,21	0,66	26,96	168,84
	Mínimo	17,91	14,55	15,89	0,54	15,30	93,56
	Máximo	32,89	16,92	18,90	0,74	40,91	267,48

Dg: diámetro medio cuadrático. Hm: altura media. Hd: altura dominante. CR: proporción de longitud de copa promedio de los árboles de cada unidad experimental, con alturas de podas logradas por lo menos un año anterior. AB: área basimétrica. V: Volumen total sin corteza por hectárea.

**Tabla 3.** Número de parcelas registradas en cada clase de CR y edad de plantación

Clases de CR	Edad (años)					Total
	5	6	7	8	9	
0,35-0,49	0	10	16	4	0	30
0,50-0,59	20	18	20	27	17	102
0,60-0,69	29	31	17	39	27	143
0,70-0,85	23	13	19	2	28	85
Total	72	72	72	72	72	360

ajustar modelos de producción y crecimiento compatibles similares a los utilizados en la metodología desarrollada por Sullivan y Clutter (1972) citada por Clutter *et al.* (1983). Además, al comparar las funciones propuestas por esos autores con varios pares de funciones de producción y crecimiento, fueron las que mejor se ajustaron a los datos.

Se ajustaron los sistemas de ecuaciones lineales mostrados en las Tablas 4 y 5, uno sin variables de poda y otro con estructura similar que incluye variables de poda, mediante el método de mínimos cuadrados

en tres etapas, propuesto por Zellner y Theil (1962) y utilizado por Borders (1989). El ajuste se efectuó de manera iterativa, realizándose las restricciones necesarias para que las ecuaciones [2] y [4] compartan los coeficientes  $b_2$  y  $b_3$  y las ecuaciones [6] y [8] compartan los coeficientes  $b_2$ ,  $b_3$  y  $b_4$  respectivamente. En cada sistema las funciones son empíricas y compatibles según la clasificación de modelos presentadas por Sanquetta (1996). Para los ajustes de las funciones, de los 1.080 pares de observaciones disponibles se utilizaron 307, correspondientes a las parcelas donde no hubo corta de árboles.

Se comparó la calidad de ajuste y eficiencia de ambos sistemas. Para comparar la calidad de ajuste se utilizaron el coeficiente de determinación ajustado porcentual ( $R_{aj}^2\%$ ) y el error estándar de estimación ( $S_{xy}$ ) de cada modelo de ambos sistemas obtenidos en la segunda etapa del ajuste respectivo. Utilizando los resultados de la prueba «t» en la tercera etapa, expresados a través de los valores de  $p < |t|$ , se evaluó la significancia estadística de la contribución de cada término presente en cada modelo (Myers, 1990). Se observaron los gráficos de residuales versus valores pre-

**Tabla 4.** Sistema de ecuaciones predictivas del área basimétrica y del volumen sin variables de poda

Número de ecuación	Expresión del modelo
[1]	$\ln(AB_1) = c_0 + c_1 S t_1^{-1} + c_2 \ln(N) + c_3 S + e_i$
[2]	$\ln(V_1) = b_0 + b_1 S + b_2 t_1^{-1} + b_3 \ln(AB_1) + e_i$
[3]	$\ln(AB_2) = t_1 t_2^{-1} \ln(AB_1) + a_1 (1 - t_1 t_2^{-1}) + a_2 S (1 - t_1 t_2^{-1}) + e_i$
[4]	$\ln(V_2) = \ln(V_1) + b_2 (t_2^{-1} - t_1^{-1}) + b_3 [\ln(AB_2) - \ln(AB_1)] + e_i$

$AB_1$ : área basimétrica de la masa ( $m^2/ha$ ) a la edad  $t_1$ .  $t_1$ : edad de la masa (años).  $S$ : índice de sitio (m).  $N$ : número de árboles por hectárea fijado por lo menos un año antes de la edad de predicción.  $V_1$ : volumen sin corteza de la masa ( $m^3 ha^{-1}$ ).  $AB_2$ : área basimétrica proyectada de la masa a una edad  $t_2$  desde una edad  $t_1$  de inicio del período de proyección ( $m^2/ha$ ).  $t_2$ : edad de la masa al final del período de proyección (años).  $V_2$ : volumen proyectado de la masa a una edad  $t_2$  desde una edad  $t_1$  de inicio del período de proyección ( $m^3 ha^{-1}$ ).

**Tabla 5.** Sistema de ecuaciones predictivas del área basimétrica y del volumen con variables de poda

Número de ecuación	Expresión del modelo
[5]	$\ln(AB_1) = c_0 + c_1 S t_1^{-1} + c_2 \ln(N) + c_3 S + c_4 CR_1 + e_i$
[6]	$\ln(V_1) = b_0 + b_1 S + b_2 t_1^{-1} + b_3 \ln(AB_1) + b_4 CR_1 + e_i$
[7]	$\ln(AB_2) = t_1 t_2^{-1} \ln(AB_1) + a_1 (1 - t_1 t_2^{-1}) + a_2 S (1 - t_1 t_2^{-1}) + a_3 CR_1 CR_2^{-1} + e_i$
[8]	$\ln(V_2) = \ln(V_1) + b_2 (t_2^{-1} - t_1^{-1}) + b_3 [\ln(AB_2) - \ln(AB_1)] + b_4 (CR_2 - CR_1) + e_i$

$CR_1$ : proporción de longitud de copa promedio a una edad  $t_1$ .  $CR_2$ : proporción de longitud de copa promedio a una edad  $t_2$ .

**Tabla 6.** Ecuaciones predictivas de la producción de área basimétrica y del volumen sin variables de poda. Estadísticos de calidad de ajuste obtenidos

N.º	Ecuaciones obtenidas	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup> , %	Sxy
[1]	$\ln(AB_1) = -2,15564 - 0,44838 S t_1^{-1} + 0,093259 \ln(N) + 0,259377 S$	94,37	0,126
[2]	$\ln(V_1) = 1,68441 + 0,20646 S - 15,0186 t_1^{-1} + 0,08669 \ln(AB_1)$	99,50	0,052
[3]	$\ln(AB_2) = t_1 t_2^{-1} \ln(AB_1) + 0,30623 (1 - t_1 t_2^{-1}) + 0,178973 S (1 - t_1 t_2^{-1})$	99,36	0,067
[4]	$\ln(V_2) = \ln(V_1) - 15,0186 (t_2^{-1} - t_1^{-1}) + 0,08669 [\ln(AB_2) - \ln(AB_1)]$	99,54	0,040

dichos y las variables regresoras de cada modelo, con el fin de observar tendencias y variación de aquellos dentro del rango de las observaciones.

Además se realizaron pruebas del funcionamiento de las ecuaciones obtenidas, dentro del rango de variación de los datos, con el fin de observar la posible sensibilidad a la intensidad de las podas expresadas por los *CR* en el sistema de ecuaciones de la Tabla 5 y calcular las diferencias absolutas y relativas entre tratamientos con distinta intensidad de poda. Para observar las predicciones de los modelos de producción se usaron tres valores de *CR*: 0,45, 0,60 y 0,75, suponiendo que se mantienen estables entre los 4 y 9 años de edad de plantación, excepto el primero, que no es practicable desde la edad de 8 años en adelante debido al crecimiento observado de la altura de los árboles.

Dado que el diámetro medio cuadrático de la masa (*Dg*) se puede calcular a través de la función  $Dg = [(4 AB) / (\pi N)]^{0,5}$ , se utilizaron los valores predichos de *AB* para calcular los correspondientes *Dg* y de esa manera obtener resultados que manifiesten la influencia de las podas sobre el tamaño medio de los árboles de la plantación.

## Resultados

### Sistema de ecuaciones predictivas de área basimétrica y de volumen sin variables de poda

En la Tabla 6 se muestran las ecuaciones obtenidas en la 3.<sup>a</sup> etapa y los estadísticos de ajuste resultantes en la 2.<sup>a</sup> etapa del ajuste de las ecuaciones presentadas

en la Tabla 4. Puede observarse que excepto para la función 1, los R<sub>aj</sub><sup>2</sup>, % superaron 99%, demostrando la alta calidad de ajuste de esas funciones ampliamente utilizadas en el ámbito forestal. Exceptuando al estimador del coeficiente *a*<sub>1</sub> del modelo 3, la prueba «t» para todos los demás coeficientes arrojó valores de *p* menores a 0,0001, indicando contribuciones altamente significativas de las variables regresoras asociadas a los mismos. Debido al método de ajuste utilizado, para cada edad y manteniendo constantes *S* y *N*, los valores predichos de *V*<sub>1</sub> y *V*<sub>2</sub> son iguales. También se cumple que las predicciones de *V*<sub>2</sub> de *t*<sub>1</sub> a *t*<sub>2</sub> y de *t*<sub>2</sub> a *t*<sub>3</sub> son iguales a las obtenidas de *t*<sub>1</sub> a *t*<sub>3</sub>.

### Sistema de ecuaciones predictivas de área basimétrica y de volumen con variables de poda

En la Tabla 7 se muestran las ecuaciones obtenidas en la 3.<sup>a</sup> etapa y los estadísticos de ajuste resultantes en la 2.<sup>a</sup> etapa del ajuste de las ecuaciones presentadas en la Tabla 5. Pueden observarse resultados de indicadores de calidad de ajuste similares a los mostrados en la Tabla 6, con muy leves mejoras respecto de los mismos. Los resultados de la prueba «t» para todos coeficientes, excepto para los estimadores de los coeficientes *a*<sub>1</sub> y *a*<sub>3</sub> del modelo 7, arrojaron valores de *p* menores a 0,0001, indicando contribuciones altamente significativas de las variables regresoras asociadas a los mismos. Para el estimador de *a*<sub>3</sub> del modelo 7, asociado a la variable *CR*<sub>1</sub> *CR*<sub>2</sub><sup>-1</sup>, el valor de *p* fue 0,037. Puede inferirse que esa variable tuvo un apor-

**Tabla 7.** Sistema de ecuaciones predictivas del área basimétrica y de volumen con variables de poda

N.º	Ecuaciones obtenidas	R <sub>aj</sub> <sup>2</sup> , %	Sxy
[5]	$\ln(AB_1) = -2,2756 - 0,4520 S t_1^{-1} + 0,0892 \ln(N) + 0,2622 S + 0,1244 CR_1$	94,87	0,119
[6]	$\ln(V_1) = 1,5373 + 0,2096 S - 15,1338 t_1^{-1} + 0,0782 \ln(AB_1) + 0,1540 CR_1$	99,47	0,054
[7]	$\ln(AB_2) = t_1 t_2^{-1} \ln(AB_1) + 0,2978 (1 - t_1 t_2^{-1}) + 0,1814 S (1 - t_1 t_2^{-1}) - 0,0111 CR_1 CR_2^{-1}$	99,36	0,067
[8]	$\ln(V_2) = \ln(V_1) - 15,1338 (t_2^{-1} - t_1^{-1}) + 0,0782 [\ln(AB_2) - \ln(AB_1)] + 0,1540 (CR_2 - CR_1)$	99,57	0,038

te significativo para explicar la variabilidad del  $AB_2$ . Como en el ajuste del sistema sin  $CR$ , también se cumple que los valores predichos de  $V_1$  y  $V_2$  son iguales para cada edad y que las predicciones de  $V_2$  de  $t_1$  a  $t_2$  y de  $t_2$  a  $t_3$  son iguales a las obtenidas de  $t_1$  a  $t_3$ , con la ventaja respecto del sistema anterior que con estas ecuaciones las predicciones son sensibles a las intensidades de poda reflejadas por  $CR_1$  y  $CR_2$  en las edades  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente.

Si bien la incorporación de la variable  $CR$  produjo en general muy leves mejoras de calidad de ajuste, puede observarse una ganancia sustancial al generarse un sistema de ecuaciones donde todas las variables respuesta son sensibles a la intensidad de poda. Las estimaciones de los coeficientes asociados al  $CR_1$  en los modelos 5 y 6 indican menor producción de  $AB_1$  y  $V_1$  al realizarse podas más intensas en los años anteriores a  $t_1$ . En la Figura 1 se muestran valores predichos de  $AB_1$  utilizando la ecuación [5], al aplicar tres intensidades distintas de poda, con valores de  $CR$  0,45; 0,60 y 0,75, manteniendo constantes los valores de índice de sitio ( $S=23$  m) y densidad ( $N=700$  árboles  $ha^{-1}$ ) entre las edades 4 y 9 años. En la Figura 2 se muestran valores predichos de  $V_1$  con la ecuación [6], considerando los mismos valores de  $CR$ ,  $S$  y  $N$  que en la Figura 1. En la Figura 3 se muestran los valores predichos de  $Dg_1$  derivados de la relación entre  $AB_1$  y  $N$ . En todos los casos se observaron menores valores de  $AB_1$  y  $V_1$  cuando más intenso fue el régimen de poda. Las diferencias relativas entre las predicciones de  $AB_1$  y  $V_1$  entre los valores extremos de  $CR$  0,45 y 0,75 se mantuvieron constantes entre las edades 4 y 9 años, con valores 3,80 y 5,03% respectivamente.

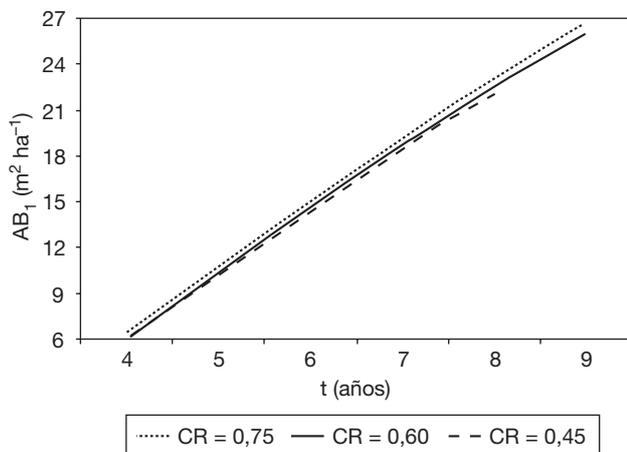


Figura 1. Valores de  $AB_1$  predichos por la ecuación [5].

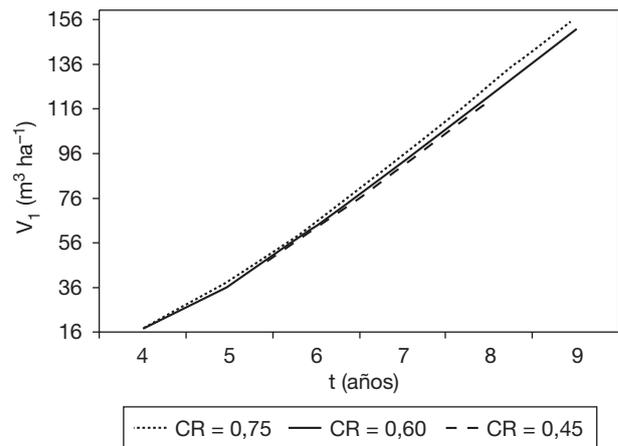


Figura 2. Valores de  $V_1$  predichos por la ecuación [6].

La función 7 de predicción de  $AB_2$  y la función 8 para  $V_2$ , muestran sensibilidad al cociente entre  $CR_1$  y  $CR_2$  y a la diferencia entre ambos respectivamente, de manera que si entre  $t_1$  y  $t_2$  disminuirían las proporciones de longitud de copa por efecto de podas posteriores a  $t_1$  más intensas que las efectuadas antes de  $t_1$ , las ecuaciones predicen  $AB_2$  y  $V_2$  menores que si  $CR_1$  fuera igual a  $CR_2$  y más bajo aún si  $CR_1$  fuera mayor a  $CR_2$  como serían los casos de realizar podas menos intensas que las anteriores a  $t_1$  o directamente no realizar más podas luego de esa edad.

En la Figura 4 se muestran los efectos de tres casos diferentes de relaciones entre  $CR_1$  y  $CR_2$  al predecirse  $V_2$  con la ecuación [8], para edades  $t_2$  desde 5 hasta 9 años, proyectados desde  $t_1=4$  años con  $AB_1=7$   $m^2$   $ha^{-1}$ ,  $V_1=17$   $m^3$   $ha^{-1}$  y  $CR_1=0,50$ , considerando  $S=23$  m. La línea superior corresponde a  $CR_2 > CR_1$ , donde a  $CR_2$

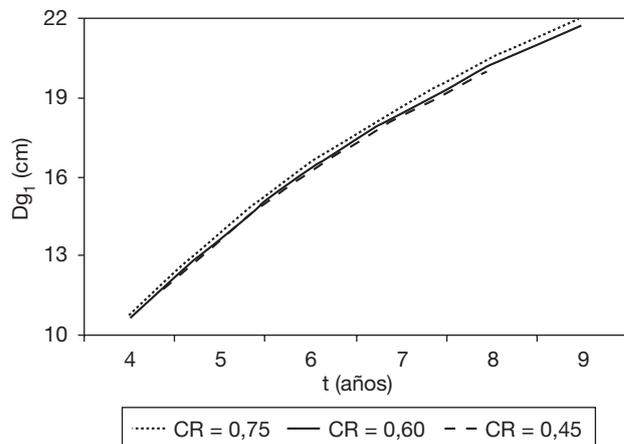


Figura 3. Valores de  $Dg_1$  derivados de las  $AB_1$  predichas por la ecuación [5].

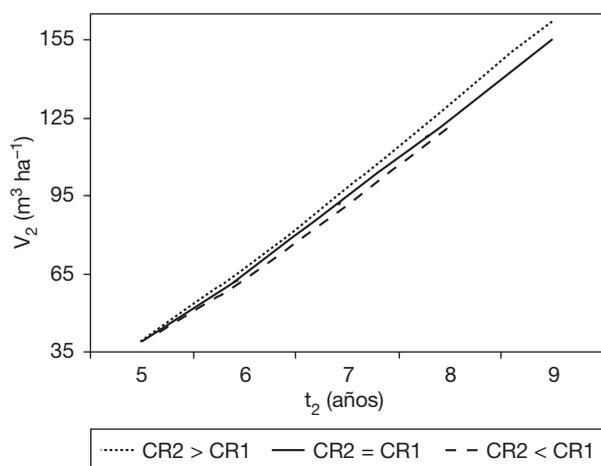


Figura 4. Valores de  $V_2$  predichos por la ecuación [8].

se le asignaron valores 0,6 para  $t_2 = 5$ , 0,7 para  $t_2 = 6$  y 0,8 para  $t_2$  desde 7 hasta 9 años. La línea intermedia se generó con  $CR_2 = CR_1 = 0,5$  para  $t_2$  desde 5 hasta 9 años. La línea inferior corresponde a  $CR_2 < CR_1$ , donde a  $CR_2$  se le asignaron valores 0,4 para  $t_2 = 5$  y 0,3 para  $t_2$  desde 7 hasta 8 años.

Los gráficos de residuales de todas las funciones predictivas del  $AB$  y  $V$  ajustadas, no mostraron tendencias de sub o sobre-estimación en todo el rango de las observaciones y manifestaron leves aumentos de variación en valores altos de las variables regresoras y áreas basimétricas y volúmenes predichos respectivamente.

## Discusión

Los resultados obtenidos reflejan que fue acertada la principal hipótesis de trabajo planteada desde el inicio del ensayo llevado a cabo: «La realización de podas necesarias para obtener madera de calidad impacta sobre el crecimiento de los árboles según sea la intensidad de las mismas».

Debido a la fuerte correlación de  $V$  con  $AB$  y ésta a su vez con  $S$ ,  $N$  y la edad de plantación, normalmente se obtienen muy buenas funciones de predicción de las primeras (Avery y Burkhart, 1994; Sanquetta, 1996; Prodan *et al.*, 1997; Crechi *et al.*, 1998; Crechi *et al.*, 1999) sin necesidad de incorporar más variables, que generalmente insumen mayores costos de recolección y procesamiento de datos. Pero la influencia de las podas severas que encontraron Meneses y Guzmán (2000) y las experiencias comentadas por García (1993) son evidencias de la necesidad de tener en cuenta los re-

gímenes de poda aplicados para modelar con precisión la producción forestal. En este trabajo se cuantificó la disminución de la producción por efectos de podas más intensas, aún al ser comparados tratamientos de podas «normales», con proporciones de longitud de copa medias remanentes entre 0,35 y 0,85.

Por una parte los resultados del sistema de ecuaciones que contienen a la proporción de longitud de copa resultaron ser biológicamente razonables (Huang *et al.*, 2003), ya que reflejan la influencia de la eliminación de ramas fotosintéticamente activas. Por otra parte puede observarse que las diferencias entre los tratamientos de poda extremos aplicados en este ensayo, no impactaron drásticamente sobre la producción volumétrica. Esto puede deberse a que si bien en general se podaron ramas vivas, éstas no pertenecían a las proporciones de longitud de copa expuestas directamente a la luz solar descritas por Assmann (1970), especialmente en los tratamientos con más levantes de poda y mayor cantidad de árboles por unidad de superficie.

En sitios de productividad similar a la del ensayo evaluado, las diferencias relativas de las predicciones de  $V_1$  entre los tratamientos de poda con  $CR_1$  0,45 y 0,75, próximas a 5%, indican que esa sería la «pérdida» de producción de volumen para obtener proporciones de fustes libres de ramas 30% superiores. Suponiendo que al momento de cosecha se mantenga la situación actual de precios de trozas de *Pinus taeda* con podas tempranas, entre 20 y 40% superior al precio de trozas sin podas para categorías similares de punta fina, tendrían que compensarse holgadamente la disminución de producción y el costo de realización de podas diferenciales.

Se obtuvieron modelos dinámicos de predicción de producción y crecimiento de rodal completo compatibles que incluyen variables asociadas a las podas, que resultan más flexibles y eficientes que las funciones de producción estáticas desarrolladas por Costas *et al.* (2006) y más precisas que las disponibles para esta especie en la región, desarrolladas por Crechi *et al.* (1999).

Las ecuaciones obtenidas pueden ser usadas como herramientas de cálculo para decidir cuánto y cuándo podar ramas fotosintéticamente activas de acuerdo a los objetivos de producción. Los resultados obtenidos son promisorios para el desarrollo de nuevos programas de simulación de producción y crecimiento regionales de *Pinus taeda*, que contemplen a las podas realizadas en los sistemas de producción intensivos.

## Agradecimientos

A los alumnos y ex alumnos de Ingeniería Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales Mariano Cáceres, Ramón Silva, Rosa Winck, Liliana Rivero, Javier Giménez, Graciela Martínez, Omar Martínez, Martín Vargas, Claudio Gómez, Raquel Winck, Rafaela Morales, Iván Kahlsdorf y Marisa Becker por su participación ad honorem en alguno/s de los cinco años de medición del ensayo.

Al Ingeniero Pedro Irschick, propietario del lote donde se instaló el ensayo, por sus aportes económicos que financiaron parcialmente la investigación, y al personal de campo de su empresa por su colaboración en la aplicación de los tratamientos.

A los evaluadores de la Revista, por sus críticas constructivas al manuscrito original y por sus sugerencias respecto de la metodología estadística utilizada, que al ser implementadas produjeron mejoras sustanciales en los resultados del trabajo.

## Referencias bibliográficas

- ALDER D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol. 2: Predicción del rendimiento. Estudio FAO: Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia. 200 pp.
- ASSMANN E., 1970. The principles of Forest Yield Study. Pergamon Press, Oxford, USA. 505 pp.
- AVERY T., BURKHART H., 1994. Forest measurements. 4.<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill, NY, EE UU. 408 pp.
- BORDERS B.E., 1989. Systems of equations in forest stands modeling. *Forest Science* 35(2), 548-556.
- BURKHART H., FARRAR K., AMATEIS R., DANIELS R., 2001. Simulation of individual tree growth and stand development in loblolly pine plantations on cutover, site-prepared areas. Publication FWS-1-87. Department of forestry. Virginia Tech. 19 pp.
- BURKHART H., AMATEIS R., WESTFALL J., DANIELS R., 2003. PTAEDA3: Simulation of individual tree growth, stand development and economic evaluation in loblolly pine plantations. Department of Forestry, Virginia Tech. 23 pp.
- CLUTTER J., FORSTON J., PIENAAR L., BRISTER G., BAILEY R., 1992. Timber management: a quantitative approach. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida. 333 pp.
- COSTAS R., KORTH S., MAC DONAGH P., FIGUEREDO S., WEBER E., IRSCHICK P., HECK J., 2005a. Predicción del rendimiento juvenil de *Pinus taeda* a través de la densidad y las podas. 3.<sup>er</sup> Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. A.Fo.A. Corrientes, 6-9 de septiembre. Actas en CD.
- COSTAS R., MAC DONAGH P., WEBER E., FIGUEREDO S., IRSCHICK P., 2005b. Influencias de la densidad y podas sobre la producción de *Pinus taeda* L. a los 7 años de edad. *Ciencia Florestal* 15(3), 275-284.
- COSTAS R., MAC DONAGH P., WEBER E., FIGUEREDO S., GÓMEZ C., IRSCHICK P. 2006. Modelos predictivos de la producción de *Pinus taeda* empleando variables vinculadas con las podas. *Bosque* 27(2), 98-107.
- CRECHI E., FASSOLA H., FERRERE P., 1999. Simulador Forestal. *Pinus taeda* V 2.0. Manual de descripción técnica. Programa Cooperativo Simulador de Crecimiento. Documento de trabajo.
- CRECHI E., FASSOLA H., FRIEDL R., 1998. Simulador Forestal. *Pinus elliottii* V 1.0. Manual de descripción técnica. Programa Cooperativo Simulador de Crecimiento INTA-FCF. Montecarlo, Misiones, Argentina. 18 pp.
- EVANS J., 1992. Plantation forestry in the tropics. 2.<sup>a</sup> ed. Oxford University Press, Oxford. 403 pp.
- GARCÍA O., 1993. Stand growth models: theory and practice. In: Advancement in forest inventory and forest management sciences. Proceedings of the IUFRO Seoul Conference, Seoul, 20-25 setiembre. pp. 22-45.
- HUANG S., YANG Y., WANG Y., 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In Amaro, Reed and Soares (ed). *Modelling Forest Systems*. pp. 271-293.
- KELLER A., FASSOLA H., PACHAS N., 2004. Efecto de la poda y raleo sobre el crecimiento de *Pinus taeda* L. a los 11 años de edad en el Departamento de Iguazú, Misiones. 11.<sup>as</sup> Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. FCF, UNaM-EEA Montecarlo, INTA. Actas en CD.
- MENESES M., GUZMÁN S., 2000. Análisis de la eficiencia de la silvicultura destinada a la obtención de madera libre de nudos en plantaciones de pino radiata en Chile. *Bosque* 21(2), 85-93.
- MUÑOZ F., ESPINOSA M., HERRERA M., CANCINO J., 2005. Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. *Bosque* 26(1), 93-99.
- MYERS R., 1990. Classical and Modern Regression with Applications. PWS-Kent Publishing Company, Boston, EE UU. 488 pp.
- PRODAN M., PETERS R., COX F., REAL P., 1997. Mensura Forestal. IICA-BMZ/GTZ, San José de Costa Rica. 561 pp.
- SANQUETTA C., 1996. Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal. Serie didática N° 08. FUPF, Curitiba, Brasil. 49 pp.
- SEITZ R., 1995. Manual da Poda de Espécies Arbóreas Florestais. FUPF, Curitiba, Brasil. 88 pp.
- SOIL SURVEY STAFF, 1991. Keys to Soil Taxonomy. AID. USDA. 754 pp.
- SULLIVAN A.D., CLUTTER J.L., 1972. A simultaneous growth and yield model for Loblolly pine. *Forest Science* 18(1), 76-86.
- ZELLNER A., THEIL H., 1962. Three-stage least squares: simultaneous estimation of simultaneous equations. *Econometrica* 30, 54-78.