

Efecto de la poda y el raleo temprano a nivel de árbol en una plantación de Pino ponderosa

Federico Jorge Letourneau¹,
Marcos Ancalao², Matías Saihueque²

Palabras Clave: teoría del conducto, intercepción de radiación, modelos lineales de efectos mixtos.

Introducción

Pinus ponderosa es la especie de conífera implantada más difundida en plantaciones forestales en la Patagonia andina Argentina (Inventario Nacional de Plantaciones Región Patagonia, 2017). Se cultiva en las zonas de ecotono, y el estado nacional lo fomenta a través de subsidios para su implantación y manejo silvícola. Los crecimientos y la característica de la especie producen, en estos sitios, árboles de crecimiento intermedio con gran cantidad de ramas en su base, que deben podarse ya sea para disminuir el riesgo de incendio, ya sea para mejorar la calidad de su madera. Sin embargo, para que las prácticas culturales sean efectivas estas deben aplicarse de forma temprana, incluso aun cuando no está definida una troza de largo comercial. Por eso existe especial interés en establecer el efecto que la poda y el raleo pueden tener sobre la tasa de crecimiento, la forma del tronco, y el tamaño de rama. El crecimiento de los árboles está relacionado a su capacidad para interceptar la radiación solar, a través de la distribución vertical del follaje (Stenberg et al, 1994), factores que son modificables por las prácticas silvícolas, con impacto sobre la asignación de biomasa del follaje, ramas y tronco, tal como lo describe la teoría del conducto (Shinozaki et al. 1964), donde pueden incluso observarse cambios en la relación que existe en el área de tejido conductivo entre ramas y tronco por efecto de la poda (Langström & Hellqvist, 1991). Para evaluar estadísticamente estos cambios es conveniente utilizar los denominados modelos lineales de efectos mixtos (Demidenko, 2013). Estos permiten discriminar componentes de varianza debido a los tratamientos o efectos fijos (por ej. poda y / o raleo) de aquellos debidos a efectos aleatorios con origen en el agrupamiento de los datos (por ej. árboles de una misma parcela y/o ramas de un mismo árbol). El

proceso consiste en ajustar un conjunto de modelos, compuesto por un modelo completo de efectos fijos (incluye todos los factores o tratamientos) y uno o varios que son una expresión reducida del modelo completo (solo contemplan algunos de los tratamientos o covariables). En todos los casos los efectos aleatorios son los mismos. De este proceso se obtienen distintos parámetros, uno de ellos es el criterio de información de Akaike (AIC), que estima la pérdida relativa de información por utilizar un determinado modelo en relación a los datos observados. Luego a través de un test de cociente de verosimilitud, conocido como LRT (Lewis et al, 2011), es posible comparar entre modelos y seleccionar aquel que minimiza la pérdida de información y por lo tanto establecer un correcto análisis de hipótesis (H_0). En este caso se plantea la H_0 de que los tratamientos silvícolas de poda y raleo, aplicados de forma temprana en pino ponderosa, modifican el patrón de asignación de biomasa en componentes fotosintéticos y no fotosintéticos de ramas y tronco.

Materiales y Métodos

Se estableció un ensayo con un diseño factorial completamente aleatorizado, sobre una plantación, ubicada en el ecotono del NO de la Prov. De Chubut, de 12 años de edad con dap medio cuadrático de 8,5 cm; y altura dominante de 4,43 m, con un índice de sitio de 13 – 15 m (Andenmatten y Letourneau, 1997), con un distanciamiento de 3 m x 3 m. En esta se aplicaron 4 tratamientos silvícolas (Trat - tratamientos: con los niveles: P poda; R raleo; PR poda y raleo; T testigo) con 5 unidades experimentales (UE) por tratamiento ($n = 20$). Las UE consistieron en parcelas de 16 plantas cada una, con una fila de bordura entre unidades. La poda removió el 50% o más de las ramas basales, mientras que con el raleo se extrajo el 50% de los árboles. Cinco años después de efectuados los tratamientos se realizó un muestreo aleatorio y destructivo de 32 árboles (8 plantas por tratamiento), con al menos 2 árboles provenientes de la

1 IFAB INTA – CONICET. Campo Anexo San Martín, EEA INTA Bariloche, “Dr. Grenville Morris”. Contacto: letourneau.federico@inta.gob.ar.
2 Campo Anexo San Martín, EEA INTA Bariloche, “Dr. Grenville Morris”.

misma UE. Sobre estos se midió su altura total, el dap, el diámetro de todas las ramas (dRama) y la altura de dos verticilos ($H_{\text{verticilo}}$) donde esta se inserta, uno ubicado en la base de la copa verde y el otro en el verticilo superior próximo al ápice. Para analizar el efecto sobre el tronco se cortaron rodajas a 10 cm (tocón) y 130 cm de altura (dap) sobre el nivel del suelo, estas fueron digitalizadas a campo mediante fotografías con escala. En gabinete se calibraron las imágenes y se determinó el incremento, post tratamiento, de la sección transversal del tronco (incG_{dap} e $\text{incG}_{\text{tocón}}$) utilizando el software Mapmaker. Además, para los mismos árboles que se extrajeron rodajas, se caracterizó la radiación incidente, empleando 8 sensores de intensidad lumínica HOBO montados sobre una vara telescópica a 30 cm del suelo y a distancias aproximadas de un 1 metro hasta sobre pasar la altura de las plantas, tomando como referencia de 100% de radiación al sensor superior, expresando el resto de los valores como porcentajes de este. La intensidad lumínica se midió en los cuatro puntos cardinales alrededor de las copas de las plantas. Para evaluar las consecuencias de los tratamientos se establecieron pruebas LRT, entre los modelos descritos en la Tabla 1. Los tratamientos y el diseño experimental se consideraron como efectos fijos y aleatorios respectivamente,

y se introdujeron covariables (L_{copaDap2} , $H_{\text{verticilo}}$) para dar cuenta de la variabilidad asociada. L_{copaDap2} es la longitud de la copa multiplicado por el cuadrado del dap, es una covariable proxy de la capacidad de interceptación de la radiación solar de la planta. Para el análisis se empleó el paquete lme4 (Bates et al, 2015) del software R (R Core Team, 2021). Además, se evaluó la capacidad predictiva del modelo 1) a través de la prueba de predicho vs observado (Piñeiro et al, 2008).

Resultados

Del análisis LRT (Tabla 2) se observa que el modelo Completo_1 es significativo para explicar las diferencias en el crecimiento del tronco (Tabla 2, 1). Este modelo (Tabla 3) predice que el tratamiento que más creció fue PR ($\text{incG}_{\text{dap}}= 9.310 \text{ mm}^2$), le siguió R ($\text{incG}_{\text{dap}}=8.502 \text{ mm}^2$), P ($\text{incG}_{\text{dap}}= 7.770 \text{ mm}^2$) y finalmente T ($\text{incG}_{\text{dap}}= 6.629 \text{ mm}^2$). El uso de la covariable L_{copaDap2} , fue significativa para minimizar las diferencias por tamaño de planta de un mismo tratamiento (Completo_1 vs reducido_12, Tabla 2, 1). Por otra parte, la prueba observados vs predichos, estableció que el modelo Completo_1 predice el valor de incG_{dap} de forma significativa, con un rango de valores (límite de confianza de 2.5% - 97.5%) de entre - 1652

Tabla 1. Lista de modelos Completos y reducidos ajustados para la prueba LRT.

Prueba realizada	Modelo ajustado	Fórmula del modelo correspondiente a los efectos fijos
1 tasa de crecimiento	reducido_11	$\text{incG}_{\text{dap}} f(\text{intercepto})$
	reducido_12	$\text{incG}_{\text{dap}} f(\text{intercepto} + \text{Trat})$
	Completo_1	$\text{incG}_{\text{dap}} f(\text{intercepto} + \text{Trat} + L_{\text{copaDap2}})$
2 patrón de asignación de biomasa del tronco	reducido_21	$\text{incG}_{\text{dap}} f(\text{intercepto} + \text{incG}_{\text{tocón}})$
	Completo_2	$\text{incG}_{\text{dap}} f(\text{intercepto} + \text{incG}_{\text{tocón}} + \text{Trat})$
3 tamaño de ramas	reducido_31	$dRama f(\text{intercepto} + H_{\text{verticilo}})$
	reducido_32	$dRama f(\text{intercepto} + \text{Trat})$
	Completo_3	$dRama f(\text{intercepto} + \text{Trat} + H_{\text{verticilo}})$

Tabla 2. Resultados de la comparación mediante LRT del modelo completo y reducidos para 1) la tasa de crecimiento, 2) patrón de asignación de biomasa del tronco y 3) tamaño de ramas.

	Modelo	Df	AIC	BIC	logLik	devianc e	Chisq	Chi	Pr(>Chisq)
1	reducido_11	3	4070	4080	-2032	4064			
	reducido_12	6	4062	4082	-2025	4050	14.2	3	0.002707**
	Completo_1	7	3912	3935	-1949	3898	151.9	1	< 2.2e-16 ***
2	reducido_21	4	266	272	-129	258			
	Completo_2	7	270	281	-128	256	1.62	3	0.6549
3	reducido_31	4	431	440	-212	423			
	reducido_32	6	494	506	-241	482	0.000	2	1
	Completo_3	7	428	443	-207	414	67.9	1	<2e-16 ***

Significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

Tabla 3. Resultado del ajuste del modelo de crecimiento Modelo Completo_1

Efectos Aleatorios			
Grupos	Varianza	Desvío Estándar	
Parcela (Intercepto)	552835	743.5	
Residuales	4820862	2195.6	
Número de observaciones:	213	Grupos (parcelas):	20
Efectos Fijos			
	Estimado	Error Estándar	Valor t
Intercepto (P)	7.770 e ⁺⁰³	5.000e+02	15.542
PR	1.540 e ⁺⁰³	6.446e+02	2.389
R	7.324 e ⁺⁰²	6.790e+02	1.079
T	-1.141 e ⁺⁰³	6.997e+02	-1.631
LcopaDap ²	1.769 e ⁻⁰¹	1.188e-02	14.892

y 902; y entre 0,93 y 1,13 para la recta de ordenada cero y pendiente uno respectivamente. En relación al patrón de asignación de biomasa del tronco, el modelo reducido_21 supera al modelo Completo_2, es decir que los tratamientos no son significativos en relación a como los árboles asignan biomasa a la altura del dap y del tocón. Sin embargo, dado que los tratamientos no afectaron la altura de los árboles (datos no presentados) pero si el crecimiento del tronco, cabe esperar diferencias en conicidad del fuste. Por otra parte el modelo Completo_3 establece el efecto significativo que Trat tiene sobre el diámetro de la rama, donde las ramas más gruesas se observaron en PR (intercepto = 52,7 mm) y un poco menor en P (46,5 mm), mientras que T (43,0 mm) y R (42,8 mm) presentaron las ramas más finas. Los perfiles de intensidad lumínica (Figura 1B) denotan, desde la aplicación de los tratamientos, una reducción significativa de la radiación incidente, por desarrollo de nuevo follaje de las plantas vecinas. Especialmente en PR, que iguala a T, para la sección donde se ubica el follaje (200 – 600 cm aprox. de altura sobre el suelo).

Discusión y Conclusiones

La poda por sí sola incrementa la tasa de crecimiento (P vs T) al eliminar las ramas basales sombreadas, que son menos eficientes y se sostienen por aporte de recursos de ramas más iluminadas (Dong et al, 2015). Por otra parte, el raleo libera recursos aumentando, principalmente, la radiación incidente (Figura 1A) y la disponibilidad de agua del suelo (R vs T). El efecto combinado de ambos tratamientos (PR) es positivo y aditivo sobre el crecimiento de los árboles (PR vs T), con un aumento de la biomasa foliar que se refleja tanto en un mayor tamaño de las ramas de PR, como en la disminución de la radiación incidente ya que es interceptada por el follaje de las plantas vecinas. Esto se observa en que la intensidad lumínica, al menos para la porción superior del perfil de PR es similar a T (Figura 1B), a pesar que PR tiene la mitad de árboles por unidad de superficie que T. La falta de diferencias en la asignación de biomasa entre el dap y el tocón entre todos los tratamientos, no se corresponde con las predicciones de Langström & Hellqvist (1991) en términos de formación de duramen. Posiblemente por la reutilización de los canales vasculares del tronco que antes formaron parte de la biomasa de hojas de ramas poco eficientes y que fueron removidas por la poda (Zeng, 2003). Se concluye que la aplicación combinada del tratamiento de primera poda y raleo tiene un efecto positivo sobre el crecimiento en diámetro, aunque, este beneficio va acompañado de un aumento del tamaño de rama, y de la conicidad del tronco. Por otra parte, estos mismos tratamientos tienen un efecto positivo en la aceleración del proceso de maduración del leño (Letourneau et al, 2014). Es necesario realizar un análisis global con posterioridad a una segunda y tercera poda para ser concluyentes en cuanto al impacto de estas prácticas silvícolas en la

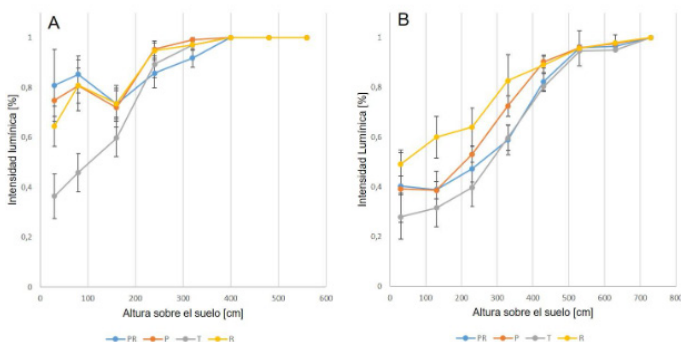


Figura 1. Perfiles de intensidad lumínica sobre el nivel del suelo al momento de aplicar los tratamientos (A) y 5 años después (B).

formación de trozas de aptitud comercial aserrables.

Agradecimientos

Al personal de apoyo del Campo Anexo San Martín por las actividades de muestreo y a la Ea. El Maitén por facilitar el sitio de experimentación. Al revisor anónimo por sus aportes para mejorar este trabajo.

Bibliografía Citada

Andematten E, Letourneau FJ, 1997. Funciones de intercepción de crecimiento para predicción de índice de sitio en pino ponderosa de aplicación en la región andino patagónica de Río Negro y Chubut. *Revista Quebracho* Vol 5, Pp 5 – 9.

Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. 2015. "Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4." *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1–48. doi:10.18637/jss.v067.i01.

Demidenko E. 2013. *Mixed Models: Theory and Applications with R*, Second Edition. Second Edition, Online ISBN:9781118651537 |DOI:10.1002/9781118651537.

Book Series:Wiley Series in Probability and Statistics
Dong T, Li J, Zhang Y, Korpelainen H, Niinemts U, Li C. 2015. Partial shading of lateral branches affects growth, and foliage nitrogen – and water-use efficiencies in the conifer *Cunninghamia lanceolata* in a warm monsoon climate. *Tree Physiology* 35, 632-643. doi:10.1093/treephys/tpv036.

Inventario de Plantaciones Forestales en Secano. 2017 Región Patagonia. Unidad Para El Cambio Rural - CIEFAP. Ministerio de Agroindustria. Presidencia de la Nación. Pp 136.

Langström B, Hellqvist C. 1991. Effects of different pruning regimes on growth and sapwood area of Scots pine. *For. Ecol. Manage.* 44: 239-254.

Letourneau FJ, Medina AA, Pampiglioni A, Ancalao M, Saihueque M, González A. 2016. Efecto de tratamientos silvícolas sobre la maduración de la madera de una plantación de Pino ponderosa. V Jornadas Forestales Patagónicas. Esquel 9 – 12 noviembre. Poster.

Lewis F, Butler A, Gilbert L. 2011. A unified approach to model selection using likelihood ratio test. *Methods in Ecology and Evolution*. Vol. 2, Pp 155 – 162.

Piñeiro G, Perelman S, Guerschman J, Paruelo JM. 2008. How to evaluate models: Observed vs predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling* Vol 216 (3-4) Pp 316-322.

R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

www.R-project.org/.

Shinozaki K, Yoda K, Hozumi K, Kira T. 1964. A Quantitative Analysis of Plant Form. The Pipe Model Theory. 1964. *Japanese Journal of Ecology*. Vol 14, No. 3. Pp 97 – 105. The Ecological Society of Japan.

Stenberg P, Kuuluvainen T, Kellomäki S, Grace JC, Jokela H, Gholz L. 1994. Crown structure, Light Interception and Productivity of Pine Trees and Stands. *Ecological Bulletins*, No. 43, Environmental Constraints on the Structure and Productivity of Pine Forest Ecosystems: A comparative Analysis, pp 20 – 34. Oikos Editorial Office. <http://www.jstor.org/stable/20113129>.

Zeng B. 2003. Aboveground biomass partitioning and leaf development of Chinese subtropical trees following pruning. *Forest Ecology and Management* 173, Pp. 135 – 144.