

Actas del VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino

27 al 30 de marzo de 2023
Ciudad de Mendoza



Organizadores



Modelo regional de altura-diámetro para árboles dominantes de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) en el noroeste de la Patagonia

Facundo José Oddi¹, Matías Guillermo Goldenberg¹,
Marcos Nacif¹, Lucas Alejandro Garibaldi¹

Palabras clave: altura dominante; modelo no lineal de efectos mixtos; sitio.

Introducción

Los bosques nativos cumplen un importante rol en el bienestar y salud de las personas. Actúan como reguladores climáticos, almacenando cerca del 45% del carbono de la biósfera terrestre (Bonan 2008) y proveen otra gran cantidad de bienes y servicios ecosistémicos (Payn et al. 2015). El actual contexto de cambio global, principalmente los procesos de cambios en el clima y en el uso de la tierra, así como la pérdida de biodiversidad, los sitúan en una situación de vulnerabilidad que resalta la relevancia de gestionarlos en forma sostenible (FAO 2020).

La gestión forestal sostenible requiere de modelos que permitan evaluar adecuadamente los atributos dasométricos de interés. Entre estos atributos, la altura y el diámetro de los árboles constituyen la base de los inventarios forestales. La altura dominante, en particular, se asocia con la productividad del bosque y la calidad de sitio (Oddi et al. 2022). Operativamente, medir la altura de un árbol consume considerable tiempo y esfuerzo, a diferencia del diámetro, de medición sencilla y rápida. Esta complejidad se incrementa en terrenos montañosos y determina errores de medición más elevados que en el caso del diámetro. Es así que en general se desarrollan modelos para predecir la altura en función del diámetro, los cuales son utilizados dentro de los modelos de crecimiento y dinámica de rodales (Curtis 1967; Corral-Rivas et al. 2014).

Los modelos de altura-diámetro (hd) pueden ser locales o generales. Los locales son desarrollados para condiciones sitio-específicas y contemplan a los árboles dentro del rodal. Los generales abarcan la heterogeneidad espacial de mayor escala (regional), lo cual incluye la variabilidad entre rodales. Una de las ventajas de estos últimos es que incorporan características del rodal en la relación hd. Estas relaciones son de na-

turalidad no lineal (Huang et al. 1992), aunque la simplicidad del enfoque lineal ha sido tradicionalmente preferida para el ajuste estadístico de los modelos hd (Bronisz y Mehtätalo 2020). Los modelos no lineales de efectos mixtos (MNLEM) son una alternativa para desarrollar modelos hd regionales (Bronisz y Mehtätalo 2020). Estos permiten modelar tendencias generales, como podría ser la curva promedio para una especie en una región, e incorporar los efectos de sitio de modo de ajustar curvas específicas para rodales o parcelas.

En la Patagonia argentina y chilena existen grandes extensiones de bosques nativos de coníferas y latifoliadas. Entre las coníferas, una de las especies más conspicuas y de aptitud forestal es el ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizzarri) (Oddi et al. 2021). En este trabajo, exploramos el desarrollo de un modelo hd regional para árboles dominantes de ciprés de la cordillera en el noroeste de la Patagonia argentina a partir del ajuste de un MNLEM. Esperamos que este trabajo contribuya al desarrollo de la silvicultura de esta especie y a la gestión de sus bosques.

Materiales y métodos

El área de estudio comprende gran parte del rango de distribución natural de *A. chilensis*. (Fig. 1). Allí, establecimos 43 parcelas de muestreo (radio ≈ 10 m) en 15 zonas ecológicamente homogéneas. En cada parcela identificamos 2-3 árboles dominantes ($n=93$) en los que medimos su diámetro a la altura del pecho o DAP (d) y su altura total (h).

Ajustamos modelos exponenciales (no lineales) de efectos mixtos para predecir la altura a partir del DAP. La forma exponencial fue seleccionada por sobre la lineal y la potencial a partir del análisis exploratorio de los datos. La función exponencial tiene dos parámetros (a y b) y los modelos evaluados variaron en la componente aleatoria asociada a éstos. El modelo general es el siguiente:

¹ Universidad Nacional de Río Negro, Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural (IRNAD); Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural (IRNAD).

$$\begin{aligned}
 h_{zpi} &\sim N(\mu_i; \sigma^2) & \mu_i &= a_p \times e^{b_p} \\
 a_p &\sim N(\mu_{a_p}; \sigma_{a_p}^2) & \mu_{a_p} &= \alpha_z \\
 b_p &\sim N(\mu_{b_p}; \sigma_{b_p}^2) & \mu_{b_p} &= \beta_z \\
 \alpha_z &\sim N(\mu_{\alpha_z}; \sigma_{\alpha_z}^2) & \mu_{\alpha_z} &= \omega \\
 \beta_z &\sim N(\mu_{\beta_z}; \sigma_{\beta_z}^2) & \mu_{\beta_z} &= \gamma
 \end{aligned}$$

Donde ipz es el i -ésimo árbol dominante de la p -ésima parcela ubicada en la z -ésima zona. Para comparar entre modelos utilizamos el criterio de información de Akaike (AIC) y el error estándar residual del ajuste. Los supuestos de los modelos fueron evaluados visualmente mediante el patrón de los residuales. Los modelos fueron ajustados con la función `nlme()` del paquete `nlme` (Pinheiro et al. 2016) de R.

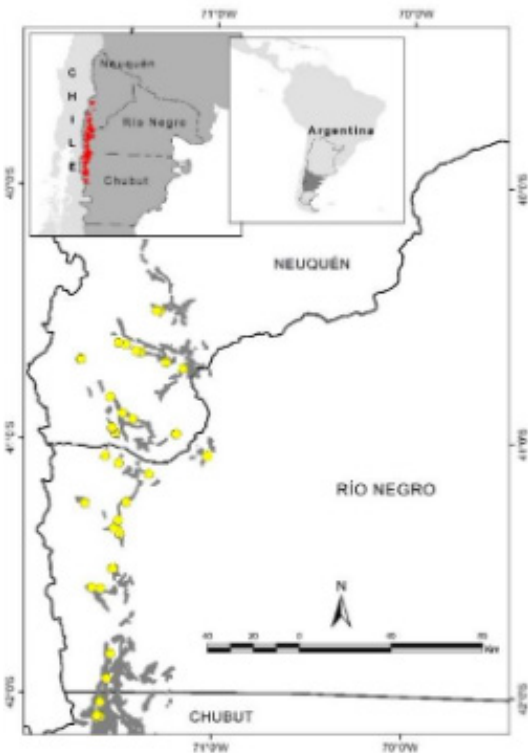


Figura 1. Área de estudio y localización de las parcelas de muestreo.

Resultados

Los mejores modelos de acuerdo a la medida de parsimonia entre bondad de ajuste y complejidad que brinda el AIC fueron, o bien incluyendo el efecto aleatorio de la zona en a o bien al incluirlo en b . Asumir variación aleatoria entre zonas en ambos parámetros aumentó el AIC. Los valores de a y b promedios (ω y γ , respectivamente) fueron de 9,27 (error estándar=0,87) m y 0,017 (0,002) para el modelo con efecto aleatorio en

a , y de 10,59 (0,93) m y 0,013 (0,003) para el modelo con efecto aleatorio en b . Estas magnitudes resultan en curvas regionales (promedio) relativamente similares en el rango de ajuste (Fig. 2). Si bien incluir los efectos aleatorios en a o en b afecta las curvas regionales o promedios, la modificación más notoria se observa en las curvas zonales. No obstante, las diferencias se minimizan cuando las curvas de ambos modelos son comparadas en el rango de diámetros de cada zona (Fig. 3). Esto explica que los modelos tuvieran similares errores estándar residual (3,14 m y 3,17 m, respectivamente).

Discusión

En este trabajo presentamos el desarrollo de un modelo regional para árboles dominantes de ciprés de la cordillera utilizando MNLEM. En los bosques de la Patagonia argentina, según nuestro conocimiento, los modelos hd para las especies arbóreas han sido desarrollados enteramente a escala local. Una posible explicación es que el error de predicción de modelos regionales como el desarrollado en este trabajo (>3 m) puede resultar excesivo para muchas aplicaciones. Incluir como predictores aquellas variables de sitio que afectan la altura dominante (Oddi et al. 2021) podría reducir el error de predicción. Es importante avanzar en esta dirección ya que los modelos de escala regional aportan información de base para la gestión forestal. Los modelos hd son, en particular, de gran utilidad para describir el crecimiento y evaluar la productividad del rodal cuando no se cuenta con datos de altura (Curtis 1967). Recientemente, se ha desarrollado un modelo regional de productividad para el ciprés de la cordillera (Oddi et al. 2022). Combinando aquel modelo con el desarrollado en este trabajo, sería posible inferir la calidad de sitio a través de la medición del DAP de los árboles dominantes.

En el rango de diámetros analizado, la relación entre DAP y altura de los dominantes mostró un patrón exponencial. Las ciencias forestales y la ecología han desarrollado relaciones hd teóricas (Chen y Brockway 2017).

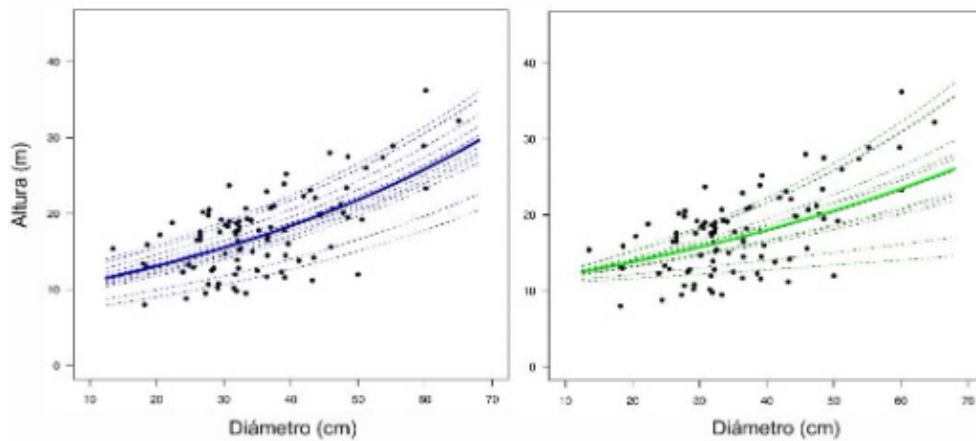


Figura 2. Modelos exponenciales de altura-diámetro (a la altura del pecho) con efecto aleatorio de la zona en el parámetro a (izquierda) y en el parámetro b (derecha). Las líneas sólidas representan el modelo regional (curva promedio) y las punteadas las curvas de cada zona.

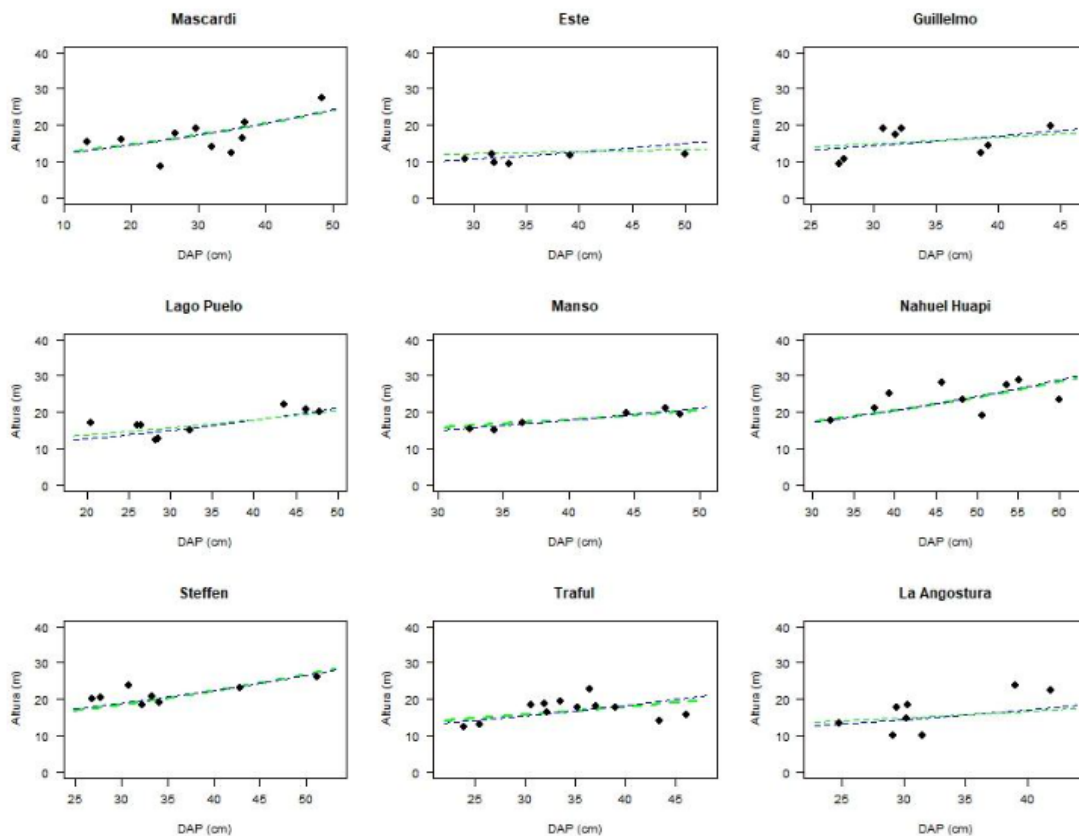


Figura 3. Comparación de las curvas zonales de altura-diámetro (a la altura del pecho) obtenidas con el modelo exponencial con efecto aleatorio en el parámetro a (azul) respecto al modelo con efecto aleatorio en el parámetro b (verde). Se muestran nueve de las 15 zonas.

Empíricamente, es común observar relaciones tipo logístico o de incrementos decrecientes, dependiendo de las fases de crecimiento abarcadas (Lei y Zhang 2004). En una de las pocas curvas de altura diámetro locales publicadas para la especie, Goya et al. (1998) encuentran este último patrón. Dado que la altura do-

minante se asume independiente de la competencia, lo cual parece cumplirse para el ciprés de la cordillera (Oddi et al. 2022), es probable que la relación hd en los individuos dominantes difiera de la del resto de los árboles del rodal (codominantes, intermedios, suprimidos).

Este trabajo muestra el potencial de los MNLEM para modelar las relaciones hd a nivel regional. No obstante, se trata de un modelo preliminar en el cual la relación exponencial fue seleccionada en base al ajuste a los datos, sin considerar aspectos teóricos. En este sentido, el modelo debería ser usado con cautela y es válido solamente para el rango de ajuste. Por ejemplo, el parámetro a del modelo exponencial expresa la altura del árbol cuando el DAP es nulo, el cual debe ser necesariamente 1,3 m de modo que no tendría sentido teórico incluir un efecto aleatorio en a . Por otro lado, los valores estimados para a son muy superiores a 1,3, lo cual indica que por debajo de los 20 cm de DAP (Fig. 2, Fig. 3) la relación hd debería diferir de la tendencia observada. Claramente, aquí también aplica lo mencionado antes sobre los aspectos diferenciales de un modelo para árboles dominantes ya que para rodales de 1,3 m de altura no tiene sentido el concepto de altura dominante.

Bibliografía citada

- Bonan G. 2008. *Ecological Climatology*. Cambridge Univ. Press. 545pp.
- Bronisz K, Mehtätalo L. 2020. Mixed-effects generalized height-diameter model for young silver birch stands on post-agricultural lands. *Forest Ecology and Management* 460(15):117901. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117901>.
- Chen X, Brockway DG. 2017. Height-diameter relationships in longleaf pine and four swamp tree species. *Journal of Plant Studies* 6(27):2.
- Curtis RO. 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *Forest Science* 13:365-375.
- FAO and UNEP, 2020. *The State of the World's Forests, In brief. Forests, biodiversity and people*. FAO, Rome. <https://doi.org/10.1515/9783035608632-002>.
- Goya JF, Yapura PF, Ferrando JJ, Barrera MD, Arturi MA. 1998. Crecimiento individual y de rodales de *Austrocedrus chilensis* en El Bolsón, Río Negro, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 103(2):149.
- Huang S, Titus SJ, Wiens DP. 1992. Comparison of Non-linear Height Diameter Functions for Major Alberta Tree Species *Canadian Journal of Forest Research* 22(9):1297-1304. <https://doi.org/10.1139/x92-172>.
- Oddi FJ, Casas C, Goldenberg MG, Langlois JP, Landesmann JB, Gowda JH, Kitzberger T, Garibaldi LA. Modeling potential site productivity for *Austrocedrus chilensis* trees in northern Patagonia (Argentina). *Forest Ecology and Management* 524:120525. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120525>.

co.2022.120525.

- Oddi FJ, Goldenberg MG, Nacif M, Heinemann K, Garibaldi LA. 2021. Supervivencia y crecimiento de plantines de ciprés de la cordillera durante siete años en dos sitios contrastantes de Patagonia norte. *Ecología Austral* 31:204-215.
- Pinheiro JC, Bates DM, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team (2016). *_nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models_*. R package version 3.1-126. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Payn T, Carnus, J, Freer-Smith P, Kimberley M, Kollert W, Liu S, Orazio C, Rodriguez L, Silva L, M Wingfield. 2015. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management* 352:57-67. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.021>.