

ARTICULOS

Curvas de índice de Sitio para *Pinus ponderosa* (Dougl.) Law de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina

Site Index and Height-Growth Curves for *Pinus ponderosa* (Dougl.) Law in the Patagonian Andean region of Chubut and Rio Negro, Argentina

ERNESTO ANDENMATTEN, FEDERICO LETOURNEAU

Campo Forestal Gral. San Martín-INTA, C.C. 26, CP. (8430) El Bolsón, Río Negro, Argentina.

SUMMARY

Anamorphic Site Index and Height-Growth Curves with application in Patagonian Andean Region were developed from a database formed by 57 stem analysis of dominant trees from 22 Ponderosa Pine stands.

Key words: site quality, Ponderosa pine, Patagonia.

RESUMEN

Se ajustaron Curvas Anamórficas de Predicción de Índice de Sitio y Crecimiento en Altura de aplicación en la región Andino Patagónica, utilizando una base de datos de 1.188 observaciones altura-edad, determinadas mediante análisis fustal de 57 árboles dominantes, seleccionados de 22 rodales de Pino Ponderosa (*Pinus ponderosa*) (Dougl.) Law.

Palabras claves: calidad de sitio, Pino Ponderosa, Patagonia.

INTRODUCCION

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar Curvas de Crecimiento en Altura y de predicción de índice de Sitio para Pino Ponderosa (*Pinus ponderosa*) (Dougl.) Law, de las cuales no existían antecedentes para el área de estudio comprendida por Bariloche como límite Norte (41° S, provincia de Río Negro) y El Corcovado al Sur (43° 30' S, Provincia de Chubut) y las isohietas de 300 a 1.500 mm de precipitación media anual, como límites Este-Oeste (Cordón *et al.* 1993).

Como antecedente se destaca el trabajo de Girardín y Broquen (1995) desarrollado en Neuquén, al norte del área de este estudio, que no presenta una función explícita de crecimiento en altura al concluir los autores que la etapa juvenil en que se encuentran las especies estudiadas no permite aplicar la metodología de Curvas de Sitio.

Para una mejor comprensión se detallan las principales convenciones adoptadas, considerando al índice de Sitio (IS) de un rodal como el promedio de las alturas dominantes a una Edad de Referencia (ER), donde la masa dominante la constituyen los 100 árboles más gruesos por hectárea, utilizando la altura total individual (H) y edad determinada a la altura del pecho (EAP) que permite eliminar gran parte de la variabilidad asociada al período inicial de establecimiento (Mitchell y Cameron 1985).

MATERIALES Y METODOS

Se seleccionaron 22 rodales con cobertura completa que no presentaran signos de raleos por lo alto ni daños evidentes, siendo un problema importante la distribución de edades de las masas

existentes, ya que condicionó la amplitud de la muestra al ser poco frecuentes aquellas que superen los 20 años de EAP (Benedetti 1990, Rey 1994, Girardin y Broquen 1995), y por el momento resulta dificultoso lograr una representación más amplia y equilibrada por tipos de hábitats. En otras palabras, se restringió la muestra de modo de lograr un balance entre parcelas de Sitio de buena a mala calidad, estimada *a priori*. Esto es necesario para evitar el sesgo que podría imprimirse al ajuste de la función si se exagera la representación, por ejemplo, de la clase de Calidad superior.

En cada parcela, de aproximadamente 700 m², se seleccionaron y apearon tres árboles muestra, que fueron los de mayor diámetro, pertenecientes al estrato dominante, y sin apariencias de daños o roturas (Edminster *et al.* 1991, Thrower *et al.* 1992), a los que se les midió DAP, altura total, altura-edad de cada verticilo, y se los trozó a 0.30 m, 1.30 m y luego cada 2.5 m. extrayendo rodela para determinar la relación altura-edad mediante lectura de anillos. Esta doble determinación permite un control cruzado de los datos provenientes de verticilos y cortes fijos, eliminando inconsistencias y errores groseros, y por determinar con mayor certeza la ubicación de la culminación anual de crecimiento en altura se evitan correcciones posteriores (v.g. método de Carmean 1972), disminuyendo la variabilidad de los datos de crecimiento de cada árbol respecto a la generada cuando se emplean secciones a distancias fijas (Di Lucca 1995).

Se logró conformar una base de datos depurada con 1.188 observaciones altura-edad que incluyen sólo las observaciones de ubicación de verticilos (cuadro 1).

CUADRO 1

Número de árboles muestra por clase de edad.
Number of site trees by age class.

Clase de edad (años)	Nº de árboles muestra
10-15	19
15-20	11
20-25	7
25-30	2
30-35	12
35-40	6
Total	57

Se puede observar que existe una evidente discrepancia entre el número de plantas apeadas por parcela con lo apropiado para determinar el IS según la definición adoptada (proporcional a los 100 más gruesos por hectárea), pero el objetivo de estos árboles es representar de forma adecuada el patrón de crecimiento individual en altura, que no debe confundirse con la estimación del IS del rodal.

Para el logro de los objetivos se siguió el método clásico de Curva Guía (Alder 1980, Zepeda *et al.* 1984, Burkhardt y Gregorie 1994), cuyos pasos son:

a) *Ajuste de Curva Guía.* Se seleccionó por revisión bibliográfica el modelo de Schumacher (Alder 1980, Carmean 1972, Burkhardt y Gregorie 1994) al considerar que el mismo combina una correcta representación biológica con bajo número de parámetros, y ha sido ampliamente utilizado con la siguiente estructura:

$$H = a \times e^{(b / EAP^c)} \quad [1]$$

Donde:

- H = altura total (m);
- EAP = edad a la altura del pecho (años);
- e = base de los logaritmos naturales;
- a, b, c = parámetros de la ecuación.

b) *Armonización y formación de Curvas de Crecimiento en Altura.* En la formación de la familia de Curvas de Crecimiento en Altura se procedió armonizando la función (Alder 1980, Zepeda *et al.* 1984, Burkhardt y Gregorie 1994) aplicando técnicas de regresión no lineal. En esta etapa es necesario establecer la Edad de Referencia, para lo cual seguimos la propuesta de Zepeda *et al.* (1984) cuando se produce el máximo incremento medio en altura. Para Pino Ponderosa en la zona de estudio se determinó que esto sucede aproximadamente a los 20 años de EAP, y coincide con la utilizada en Chile, Australia y Nueva Zelanda para Pino Radiata (McIaren, 1993) y que Andenmatten y Letourneau (1996) adoptaron con resultados satisfactorios en el desarrollo de curvas similares para Pino Oregón de aplicación en la misma región de este estudio.

c) *Curvas de índice de Sitio.* Posteriormente las curvas de índice de Sitio basadas en altura y

edad se construyeron mediante deducción matemática a partir de la función armonizada de Crecimiento en Altura (Curtis 1964, Burkhardt y Gregorie 1994).

d) *Clases de Calidad de Sitio*. Como paso final de acuerdo al rango de índices de Sitios encontrados se establecieron Clases de Calidad de Sitio con amplitudes de 3 m (Zepeda 1984).

e) *Autovalidación*. Dada la escasa cantidad de información disponible la misma se empleó completamente en el proceso de ajuste de la función, optando por un procedimiento de autovalidación sobre los mismos datos para probar la bondad del modelo al estimar índices de Sitio, aplicando la siguiente metodología. Se agruparon los árboles de la muestra de acuerdo a las Clases de Calidad de Sitio que se definieron. En cada grupo se promediaron las alturas correspondientes por año de EAP y a cada uno de estos pares promedio de observaciones (H-EAP) se les estimó el IS (ISest.) aplicando la correspondiente Curva de Crecimiento en altura. Posteriormente se contrastaron contra el IS observado (ISobs.), determinando los correspondientes desvíos (Johnson y Worthington 1963).

RESULTADOS Y DISCUSION

El modelo ajustado que constituye la Curva Guía quedó definido según [2]:

$$H = 477.83 \times e^{\left[\frac{-7.444304}{EAP^{0.245151}} \right]} \quad [2]$$

presenta un buen ajuste con $R^2=0.88$, resultando significativo el ANOVA ($p<0.05$ cuadro 2), observando en el análisis visual que la representación gráfica de datos contra la curva ajustada (fig. 1) resultó satisfactoria (Alder 1980). Para interpretar adecuadamente el ANOVA se debe recordar que las mediciones efectuadas sobre un mismo árbol difícilmente puedan considerarse independientes entre sí, ya que es muy probable que el crecimiento de un año a otro esté correlacionado, y por lo tanto se cuestionan los grados de libertad del análisis de varianza y la significación de la prueba de F (cuadro 2), pero no los coeficientes del modelo obtenidos por mínimos cuadrados (Alvarez 1995).

CUADRO 2

ANOVA para el Modelo de Schumacher, ajustado como Curva Guía.
ANOVA of Schumacher's Guide Curve fitted.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrado medio	F.
Modelo	115.335	3	38.445.30	8.667.4
Error	5.256	1.185	4.43	
Total	120.592.12	1.188		

Otra importante consideración corresponde al parámetro "a" que en el modelo de Schumacher representa la Altura máxima o asintótica que podría alcanzar la especie si creciera indefinidamente (Alder 1980). Es evidente que el valor 477.83 m no corresponde con ningún valor biológicamente coherente. Esto podría originarse en la constitu-

ción de la muestra donde los árboles no superan los 40 años de EAP, y se encuentran en una etapa de crecimiento muy activo. Para lograr valores biológicamente aceptables se necesitarían masas de mayor edad que completen el patrón general de crecimiento de la especie alcanzando los valores asintóticos.

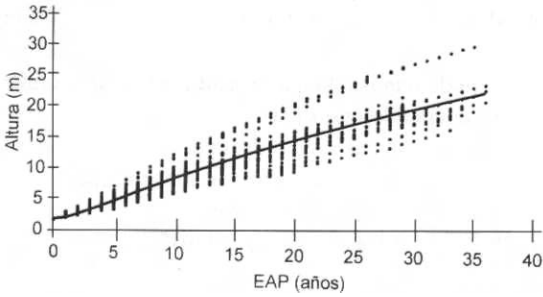


Figura 1. Curva Guía (Modelo de Schumacher) superpuesta a observaciones altura/edad.
Guide curve (Schumacher function) over height/age data pairs.

En el siguiente paso la Curva Guía Armonizada, siguiendo lo propuesto por Alder (1980), Zepeda (1984), Burkhardt y Gregorie (1994), queda expresada según [3]:

$$H = 1.3 + (IS - 1.3) \times e^{-7.444304 \left[\frac{1}{EAP^{0.245151}} - \frac{1}{20^{0.245151}} \right]} \quad [3]$$

y permite formar la familia de Curvas de Crecimiento en Altura deseadas según índice de Sitio (IS) (fig. 2).

Al aplicar a los datos originales y basados en el rango observado de IS ($9 \text{ m} \leq IS \leq 21 \text{ m}$) se formaron cuatro Clases de Calidad de Sitio (CS) de una amplitud de tres metros cada una (Zepeda 1984), denominándolas Clase I (Muy buena, $18 \leq IS \leq 21 \text{ m}$), II (Buena, $15 \leq IS \leq 18 \text{ m}$), III (Regular $12 \leq IS \leq 15 \text{ m}$), IV (Mala $9 \leq IS \leq 12 \text{ m}$) siguiendo una división similar a la propuesta por Mitchell y Cameron (1985) para su trabajo en Pino Oregón (fig. 2).

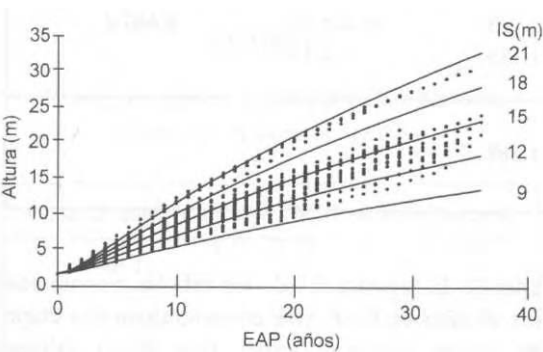


Figura 2. Curvas de Crecimiento en Altura por Clase de Sitio.
Height growth curves by Site Class.

Por último, se presenta la función de Predicción del IS [4] deducida del modelo armonizado de Crecimiento en Altura (Curtis 1964, Burkhardt y Gregorie 1994):

$$IS = 1.3 + (H - 1.3) \times e^{-7.444304 \left[\frac{1}{20^{0.245151}} - \frac{1}{EAP^{0.245151}} \right]} \quad [4]$$

que permite construir las curvas de índice de Sitio (IS) según altura y edad (fig. 3). Para ello a partir de una H dada se levanta la ordenada hasta cortar la recta correspondiente a la EAP, correspondiendo la intersección con el IS, permitiendo visualizar la relación desde otro punto de vista, donde la misma H puede corresponder a distintos IS poniendo de manifiesto la diferencia de potencial entre uno y otro.

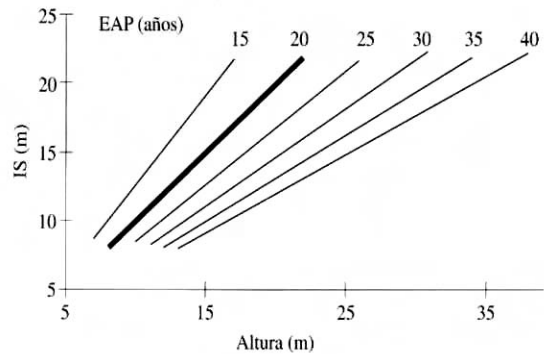


Figura 3. Curvas de índice de Sitio según Altura y EAP.
Site Index curves by Total height and dbh age.

Autovalidación. Al aplicar la metodología propuesta y graficar los errores se observa que a edades tempranas la función presenta grandes apartamientos (errores) en la predicción del IS, disminuyendo por debajo de 1 metro a partir de los 10 años, resultando cercano a cero a la Edad de Referencia (fig. 4). Para distintas especies y metodologías de ajuste se han observado patrones similares en la distribución de los errores de predicción del IS (Johnson y Worthington 1963, Thrower 1989) que se consideran aceptables. Un modo de obviar este inconveniente en rodales jóvenes consiste en aplicar el método de Intercepción del Crecimiento (Thrower 1990), desarrollado para la región con buenos resultados (Andenmatten y Letourneau 1997).

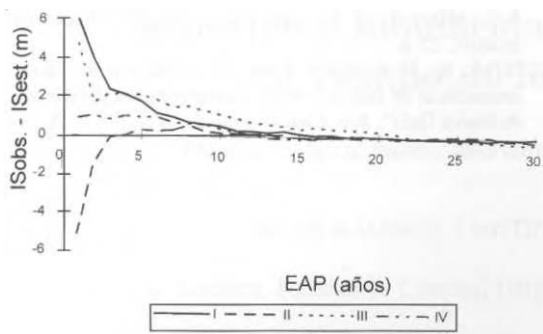


Figura 4. Errores en la predicción del IS según Edad y Calidad de Sitio.

Site Index prediction error by site class.

CONCLUSIONES

Para la región comprendida entre San Carlos de Bariloche (provincia de Río Negro) como límite Norte y Corcovado (provincia del Chubut) como límite Sur, entre las isohietas de 300 a 1.500 mm, se propone el empleo de las expresiones determinadas para Crecimiento en Altura [3] y predicción de índice de Sitio [4]. En edades juveniles (inferior a 10 años) se recomienda el empleo del método alternativo de Intercepción de Crecimiento.

Se requerirá una validación cuando se considere que pueden existir diferencias de origen genético, o en plantaciones ubicadas fuera del ámbito geográfico descrito, o se superen los límites de rango propuesto para $IS \leq (9 \leq IS \leq 21)$ y edad a la altura del pecho (≤ 40 años).

AGRADECIMIENTOS

Al técnico forestal Christian Jiménez, quien realizó la mayor parte del trabajo de campo y diseñó las primeras planillas para el análisis de la información recolectada. Los fondos necesarios fueron aportados por Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Universidad Nacional de la Patagonia, Consejo de Ciencia y Técnica de la provincia del Chubut y un esfuerzo especial de la Cooperadora del Campo Forestal Gral. San Martín-INTA.

BIBLIOGRAFIA

- ALDER, D. 1980. "Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Con especial referencia a los trópicos". Vol. 2. Predicción del rendimiento. Roma. Estudio FAO: Montes 22/2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 80 pp.
- ALVAREZ, O. 1995. "Apuntes teóricos. Curso de Estadística". Campo Forestal Gral. San Martín-INTA. Inédito.
- ANDENMATTEN E., F. LETOURNEAU. 1996. "Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura para Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii*) (Mirb.) Franco de aplicación en la región Andino Patagónica de las provincias de Río Negro y Chubut, Argentina". *Revista de la Facultad de Agronomía, Univ. Nac. de La Plata*. En prensa.
- ANDENMATTEN E., F. LETOURNEAU. 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, Argentina". *Quebracho* (5): 5-9.
- BENEDETTI, J. 1990. "Mapa de distribución de plantaciones del NO del Chubut según edades". Dirección de Bosques provincia de Chubut. Inédito.
- BURKHART, H., T. GREGORIE. 1994. "Forest Biometrics". Handbook of Statistics, Vol. 12, Fourth Edition MacGraw Hill.
- CARMEAN, W. 1972. "Site Index Curves for Upland Oaks in the Central States", *For. Sc.* Vol. 18 (2): 109-120.
- CORDON, V., J. FORQUERA, J. GASTIAZORO. 1993. "Estudio microclimático del Area Cordillerana del Sudoeste de la provincia de Río Negro. Cartas de Precipitación". Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ciencias Agrarias. Cinco Saltos, Río Negro, Argentina, 17 pp.
- CURTIS, R. 1964. "A Stem-Analysis Approach to Site-Index Curves", *For. Sc.* Vol. 10 (2): 241-255.
- DI LUCCA, M. 1995. "Curso de Modelos de Crecimiento y Producción Forestal". Bariloche, Argentina, INTA, 54 p.
- EDMINSTER, C., R. MATHIASSEN, W. OLSEN. 1991. "A Method for Constructing Site Index Curves from Height-Age Measurements Applied to Douglas-Fir in the Southwest". Research Note RM-510, USDA Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station.
- GIRARDIN, J.L., P. BROQUEN. 1995. "El crecimiento de *Pinus ponderosa* Dougl. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Dougl. en diferentes condiciones de sitio (provincia de Neuquén, R. Argentina)", *Bosque* Vol. 16 (2): 57-67.
- JOHNSON F., N. WORTHINGTON. 1963. "Procedure for developing a Site Estimating System from Stem Analysis Data". U.S. Forest Service, Research Paper PNW-7.
- MACLAREN, J. 1993. "Radiata Pine Grower's Manual". New Zealand Forest Research Institute.
- MITCHELL, K.J., I.R. CAMERON. 1985. "Managed Stand Yield Tables for Coastal Douglas-Fir: Initial Density and Precommercial Thinning". Land Management Report Number 31. B.C. Ministry of Forests Research Branch, 69 p.
- REY, M. 1994. "Censo de plantaciones forestales de la provincia de Río Negro". Consejo Federal de Inversiones, Argentina.
- THROWER, J. 1989. "Site Quality Evaluation Using Site Index". Presentation given at Silviculture Institute of British Columbia, Module III Training Course at Surrey BC, 11 p.

THROWER, J. 1990. "Growth intercepts for estimating site index". Presentation given at EP 703 Workshop, November 7, Victoria, B.C. Canada.

THROWER, J. GOUDIE. 1992. "Development of Height-Age and Site Index Functions for Even-aged Interior Douglas-Fir in British Columbia". Research Note N° 109.

B.C. Ministry of Forests. Forest Science Research Branch, 22 p.

ZEPEDA, B., B. RIVERO. 1984. "Construcción de curvas anamórficas de índice de Sitio: Ejemplificación del método de Curva Guía", *Rev. Ciencia Ftal.* 51. Vol. (9): 1-38.