



Editada por el Centro de Información y Gestión Tecnológica. CIGET Pinar del Río

Vol. 15, No.2 abril - junio, 2013

ARTÍCULO ORIGINAL

Modelos del perfil del fuste para *Pinus caribaea* var *caribaea* en la provincia Pinar del Río, Cuba

Stem models for *Pinus caribaea* var *caribaea* in Cuba, Pinar del Río, province

Hector Barrero Medel, Daniel Álvarez Lazo², Yatsunaris Alonso Torrens³

Universidad Hermanos Saíz Montes de Oca. Martí 270 final Pinar del Río, Cuba.

¹Doctor en Ciencias Forestales. Correo electrónico: hbarrero@af.upr.edu.cu

²Doctor en Ciencias Forestales. Correo electrónico: daniel@af.upr.edu.cu

³Master en Ciencias Forestal. Correo electrónico: yatusnaris@af.upr.edu.cu

RESUMEN

En este trabajo se ajustan modelos del perfil del fuste de diámetro con corteza, diámetro sin corteza y grosor de corteza del árbol general para el *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari en cuatro Empresas Forestales Integrales de la Provincia de Pinar del Río: Viñales, Pinar del Río, La Palma y Macurije. Para la investigación se empleó la información obtenida en plantaciones de esta especie, para lo cual se seleccionó al azar mediante un muestreo aleatorio simple 348 árboles, derribados y trozados en secciones de 1 m, a los cuales se les midió el diámetro con y sin corteza, grosor de corteza, y la altura total, luego mediante el procesamiento estadístico se obtuvieron como las de mejor

comportamiento predictivo las ecuaciones parabólicas cúbicas en función de las variables

$$\frac{Ht - hi}{Ht - 1,30}$$

y ponderando el dcc y dsc con el dcc_{1.30}.

Palabras clave: Perfil del fuste, Diámetro con corteza, Diámetro sin corteza.

ABSTRACT

This paper models fit the profile of stem diameter over bark and diameter without bark general tree for *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret and Golfari in 4 of the Integrated Forest Enterprises Pinar del Río Province: Viñales, Pinar del Rio, La Palma and Macurije. To research the information obtained was used in plantations of this species, to which was randomly selected by simple random sampling 348 trees felled and chopped into sections of 1 m, at which the diameter was measured with and without bark, crust thickness, and total height, then using the statistical processing were obtained as the best

performing predictive cubic parabolic equations based on variables $\frac{Ht - hi}{Ht - 1,30}$ and weighting the dcc and the dcc_{1.30} dsc.

Key words: Stem Profile, Bark diameter, Diameter without bark.

INTRODUCCIÓN

Los modelos fustales constituyen una importante herramienta estadística de uso corriente en la determinación de volúmenes de árboles y trozas; permiten al usuario estimar tres características básicas de los árboles: diámetros en cualquier punto del fuste, altura del fuste en que se encuentra un diámetro límite especificado y el volumen entre dos puntos cualesquiera del fuste, o volumen hasta cualquier índice de utilización.

Las características mencionadas son parte fundamental de cualquier sistema flexible de procesamiento de datos para determinar existencias que consideren la evaluación de productos. Por otra parte, los modelos fustales tienen aplicación en los simuladores de crecimiento y rendimiento y en la simulación de trozado, cuando un usuario tiene interés en conocer el surtido de productos posible de obtener de la simulación de diferentes estrategias de manejo Prodan *et al.* (1997).

Los modelos del perfil pueden ser utilizados en técnicas objetivas de toma de decisiones de trozado para obtener el máximo rendimiento posible de fustes a trozar, como el que utiliza la programación dinámica propuesta por Laclau, (1995), permite conocer la evolución de la conicidad a lo largo del fuste (Ormerod, 1973; Clutter, 1980; Biging, 1984; Kozak, 1988) y el rendimiento de cada una de sus trozas (Rodríguez y Broto, 2003).

Esta descripción detallada de la forma del fuste permite analizar la influencia que distintos factores (espesura, longitud de copa, calidad de estación, etc.) y/o el efecto de distintas operaciones silvícolas (raleos, podas, fertilización, etc.) tiene sobre la producción. Sterba, (1980) sugiere que el conocimiento de la influencia de estos factores posibilitará modificar la forma del árbol mediante la gestión forestal de acuerdo con los objetivos propuestos. Así, la realización de fuertes fertilizaciones aumenta el vigor, tiende a incrementar la copa y, por tanto, a modificar el perfil (Tepper *et al.* 1968; Flinn, 1984; Gordon y Graham, 1986; Jokela *et al.* 1989; Valinger 1992; BI y Turner, 1994).

Una de las estrategias del Sector Forestal en Cuba hasta el 2015 es la implementación de técnicas novedosas que eleven el rendimiento y calidad de la madera para mitigar el efecto de las tomas de decisiones inadecuadas en la planificación de la economía Forestal, por lo que son estas técnicas las herramientas idóneas para lograr este fin.

Es por ello que en correspondencia con los lineamientos de la política del sector y los del 6to congreso del Partido Comunista de Cuba para aumentar los rendimientos y racionalizar el recurso madera este trabajo tuvo como objetivo ajustar los modelos del perfil del fuste de diámetro con corteza, diámetro sin corteza y grosor de corteza del árbol general para el *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari en cuatro Empresas Forestales Integrales de la Provincia de Pinar del Río.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló en cuatro Empresas Forestales Integrales (EFI): Pinar del Río, Macurije, La Palma y Viñales, áreas representativas para la investigación donde se

centra el macizo de Pinares de *Pinus caribaea* Morelet var *caribaea* Barret y Golfari más extenso de la región.

La información fue obtenida de plantaciones de la especie, en las cuales mediante un muestreo aleatorio simple se seleccionan al azar 348 árboles, derribados y trozados en secciones de 1 m, a los cuales se les midió el diámetro con y sin corteza, grosor de corteza, y la altura total.

Una vez obtenidos los datos y procesados con el tabulador electrónico (Excel), se procedió al ajuste del modelo general, evaluando funciones de la familia de curvas denominadas parábolas por su efectividad y eficacia a la hora de modelar el perfil:

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 \text{ -----Parábola cuadrática}$$

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3 \text{ -----Parábola cúbica}$$

Estos modelos se verifican para la mayoría de los sólidos geométricos simples a los cuales puede compararse el tallo Calliez, (1980).

Los modelos se obtuvieron mediante los procedimientos de la regresión no lineal, y la estimación curvilínea con el empleo del procesador estadístico SPSS v. 15.0 para Windows, mediante el cual se obtuvo para la comparación de los modelos los estadísticos clásicos de bondad de ajuste como: coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj), el error estándar de la estimación (S_x) y la significancia estadística de los coeficientes de regresión ajustados mediante la prueba t-student. Aquellos modelos que presentaron al menos un parámetro no significativamente distinto de cero fueron eliminados. Para comparar el error estándar de la estimación (comúnmente calculado en el análisis de regresión) de ecuaciones con distintas variables dependientes, se calculó el índice de Furnival "IF" (Furnival, 1961). La interpretación del IF es de carácter inverso a los de la máxima verosimilitud, por lo tanto un valor grande indica ajuste pobre y viceversa (Furnival, 1961). El IF es determinado mediante la ecuación siguiente:

$$IF = s * \text{antilog} ((\sum \log f' (y) - 1)/n)$$

Donde:

s: desviación estándar del residual de la regresión ajustada

$f'(y)$ -1: recíproco de la derivada de la transformación de la variable y , con respecto a la misma y

n : número de datos

Este índice es ampliamente utilizado como indicador del buen ajuste tanto para los modelos de perfil como para los modelos de volumen de troza para la confección de las tarifas de cubicación, recomendado por Alder (1980), Ares (1999), Salas *et al.* (2005).

Las capacidades predictivas se evaluaron en la totalidad de la muestra empleada para la validación de los modelos (validación independiente) mediante los estadísticos de exactitud y sesgo: raíz del error medio cuadrático (REMC) y la diferencia agregada (media de los residuales) DIFA% respectivamente. Ambos estadísticos están expresados como una proporción de la media del grupo y son recomendados por su efectividad por Cao *et al.*, (1980), Max y Burkart., (1985), Real (1993), Rodríguez y Molina (2003), Novo, Rojo y Álvarez (2003), Barrio *et al.* (2007), Gezan, Moreno y Ortega (2009). Para estos estadísticos, el mejor modelo corresponderá al que presente los valores más cercanos a cero, ante dos valores iguales de error, el modelo que estime con un menor (REMC) puede considerarse superior.

Para el caso de la DIFA% si un modelo es insesgado, se espera que esta suma sea cercana a cero; sin embargo, si el modelo resulta sesgado, la suma de los residuales será diferente de cero. En este estadístico los signos negativos están asociados con sobrestimaciones, en tanto que los valores positivos indican subestimaciones.

Estos estadísticos son determinados mediante las siguientes expresiones:

$$RECM\% = \frac{100}{\bar{y}} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{1/2}$$

$$DIFA\% = \frac{100}{\bar{y}} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \right]$$

Donde: y_i y \hat{y}_i corresponden al valor observado y estimado de la medición i -ésima; \bar{y} es el promedio y n el total de observaciones.

La medida del error y sesgo para el caso específico de los modelos de perfil y grosor de corteza se deben aplicar a todos los árboles muestras, tanto para el total del fuste como para porciones de él, se divide el fuste en secciones de igual longitud, para comprobar las

características y performance del modelo en las diversas porciones del fuste de donde provendrán los surtidos de productos posibles a obtener.

Se analizó las capacidades predictivas estableciendo clases de validación de la altura en por ciento hi (%) de una muestra independiente de 50 árboles tomados al azar.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Ecuación del perfil para el diámetro con corteza (dcc)

La existencia de un modelo de perfil del fuste para *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en Cuba puede juzgar de innecesario la realización de este trabajo, la cuestión es que el modelo con que hasta el momento se cuenta para la especie, para las condiciones de los bosques cubanos, fue realizado como un estudio de caso por Ares (1999) en bosques naturales de la EFI La Palma. Como bien quedó explicado en el marco teórico de esta tesis, cada situación (bosque natural o plantación) en función de la densidad existente además de otros factores que para cada caso son diferentes condicionan la forma fustal en particular, el modelo establecido para los bosques naturales de la especie no garantiza un ajuste adecuado a la forma del fuste del árbol en plantación, ya que el mismo debido a las características propias de este tipo de formación, tiene un comportamiento lineal es por ellos que se evalúa cada una de las variables

$\frac{dcc}{dcc_{1,30}}$, $\log \frac{dcc}{dcc_{1,30}}$, $\frac{dcc}{Ht}$ dependientes en función de $\frac{hi}{Ht}$, $\frac{Ht-hi}{Ht-1,30}$ y $\ln \frac{hi}{Ht}$ para dos ecuaciones polinómicas que representan una parábola cuadrática y una parábola cúbica.

Resultando de la regresión de cada una de las ecuaciones las bondades de ajuste representadas además del cálculo de capacidades predictivas para evaluar los modelos en la *Tabla 1*.

Tabla 1.- Bondad de ajuste y capacidades predictivas de las ecuaciones ajustadas para el dcc.

Ecuaciones*	R	R ²	R ² aju	Error tip	REM	Da	IF
1		,95	,9539	,05546	0,010	-0,0004	0,0307
2		,90	,9080	,90801	0,014	-0,0004	0,0433
3		,95	,9548	,05494	0,010	-0,0003	0,0304
4		,88	,8851	,09504	0,016	-0,0003	0,0487
5		,84	,8435	,11095	0,019	-0,0003	0,0568
6		,88	,8872	,09418	0,016	-0,0003	0,0483
7		,96	,9672	,04676	0,009	-0,0031	0,0267
8		,95	,9555	,05449	0,010	-0,0004	0,0302
9		,96	,9681	,04612	0,008	-0,0003	0,0255
10		,89	,8969	,09002	0,016	-0,0003	0,0468
11		,88	,8862	,09461	0,101	0,0396	0,2700
12		,89	,8994	,08894	0,015	-0,0003	0,0456

De forma general todos los modelos analizados presentan bondades de ajustes aceptables siendo el modelo 9 representado por una parábola cúbica la ecuación de mejor comportamiento con el error típico más bajo de 0.04 y el coeficiente de determinación

$$\frac{Ht - hi}{Ht - 1,30}$$

ajustado más alto de 0,97 teniendo como variable independiente coincidiendo con Bruce *et al.* (1968) con la propiedad de que el modelo estime el diámetro de referencia cuando la altura en el fuste es la medición del diámetro (1.30) permitiendo el condicionamiento del modelo sin intercepto para estimar el d cuando hi es 1,30, bajo la condición de ajustar el diámetro con corteza en forma exclusiva.

Según Calliez, (1980) no se debe juzgar la calidad de una regresión lineal por el valor del coeficiente de correlación R, puede que este valor sea elevado y el ajuste no sea adecuado, por lo que es de vital importancia analizar la exactitud y los sesgos mediante el análisis de las capacidades predictivas.

Este análisis es considerado satisfactorio (*Tabla 1*), ya que ninguna ecuación superó el 10% en RECM, mostrando un buen comportamiento predictivo. Las diferencias en la medida de la exactitud a nivel global son mínimas.

Los modelos son insesgados y en general sobrestiman levemente en un rango de 0.0003 a 0.0031 el dcc, sólo el modelo 11 subestima el 0.03 %, por lo que resulta de este análisis como el mejor modelo el 9.

Ecuación del perfil para el diámetro sin corteza (dsc)

Por la fuerte correlación existente entre el diámetro con y sin corteza como es lógico se obtuvo como resultado la regresión como el modelo de mejor bondad de ajuste el 9 al igual que en el caso anterior coincidiendo con Bruce *et al.* (1968) con la propiedad de que el modelo estime el diámetro de referencia cuando la altura en el fuste es la medición del diámetro (1.30) permitiendo el condicionamiento del modelo sin intercepto para estimar el d cuando hi es 1.30, bajo la condición de ajustar el diámetro con corteza en forma exclusiva.

Siendo el modelo 9 el de mejor bondad de ajuste, el cual representa una parábola cúbica con el error típico más bajo de 0.04 y el coeficiente de determinación ajustado más alto de 0.97.

La exactitud global (no segregando por clase de validación) de los modelos es considerada satisfactoria, ya que ninguna ecuación superó el 10% en RECM al igual que la obtenida para el modelo de dcc (Tabla 2), mostrando un buen comportamiento predictivo. Las diferencias en la medida de la exactitud al igual que en el caso anterior del dcc a nivel global son mínimas.

Tabla 2.- Bondad de ajuste y capacidades predictivas de las ecuaciones ajustadas para el dsc.

Ecuaciones*	R	R ²	R ² aj	Error tip	REMC	Da	IF
1	,943	,889	,889	,08253	0,026	0,023	0,033
2	,947	,897	,897	,07319	0,028	0,023	0,045
3	,980	,961	,961	,04507	0,026	0,023	0,033
4	,942	,888	,888	,08301	0,029	0,023	0,050
5	,911	,831	,830	,10228	0,031	0,023	0,058
6	,943	,889	,889	,08253	0,029	0,023	0,050
7	,948	,899	,898	,07907	0,031	0,023	0,029
8	,978	,958	,957	,04688	0,029	0,023	0,033
9	,985	,971	,970	,03898	0,025	0,023	0,029
10	,947	,897	,897	,07967	0,026	0,023	0,048
11	,941	,885	,885	,07907	0,025	0,023	0,050
12	,948	,899	,898	,07907	0,028	0,023	0,047

Los modelos son insesgados y en general a diferencia del análisis del dcc sobrestiman el dcc levemente resultando como el mejor de los modelos el 9.

Los resultados obtenidos para las variables dcc y dsc coinciden con los obtenidos

$$\frac{Ht - hi}{Ht - 1.30}$$

considerando con variables independientes por Bruce *et al.*, (1968) para el *Pinus*

insigne en Chile de amplio uso en plantaciones de la VII, VIII y IX regiones de ese país (INFORA 1984, 1985).

Los modelos obtenidos facilitan en primer lugar conocer el diámetro a las diferentes alturas del árbol adecuándolos a las condiciones de estas empresas, fijar la altura para un diámetro tope, dígame altura comercial u otra definida como límite para la industria del aserrío, permitiendo la clasificación de la madera por sus dimensiones y una mayor efectividad en los esquemas de corte, y por consiguiente un mayor aprovechamiento de la madera. Además se logra con estos modelos una mayor precisión en el cálculo del volumen, con una mayor fiabilidad estadística y control del error, ya que tienen en cuenta el ahusamiento y la forma específica de los árboles, factores decisivos en el sesgo, los que denotan por sí solos la gran importancia de su determinación.

La ecuación del perfil es una oportunidad para homogeneizar las cubicaciones de árboles en esta empresa forestal, permitiendo unificar criterios y el empleo de una sola ecuación estable y precisa.

CONCLUSIONES

- Las ecuaciones de perfil del fuste para el dcc y dsc que cumplen con todos los supuestos estadísticos, y además entregan las mejores predicciones fueron:

$$\frac{dcc}{dcc_{1,30}} = 0,0612 + 2,2315 \frac{Ht-hi}{Ht-1,30} - 2,625 \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1,30} \right)^2 + 1,4179 \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1,30} \right)^3$$

$$\frac{dsc}{dsc_{1,30}} = -0,0047 + 1,9798 \frac{Ht-hi}{Ht-1,30} - 2,1486 \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1,30} \right)^2 + 1,0752 \left(\frac{Ht-hi}{Ht-1,30} \right)^3$$

- La aplicación de las ecuaciones propuestas, produce una estimación notablemente mejor que las obtenidas por otras ecuaciones propuestas por Ares, (1999) para la especie.
- La aplicación de las ecuaciones seleccionadas en otras áreas (diferentes a la empleada para el ajuste), debe pasar por una etapa de validación, en la cual se pueda calibrar las estimaciones que éstas entregan, a través de procedimientos estadísticos, en un número reducido de árboles de prueba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ares E. (1999). Tablas Dasométricas para bosques naturales de *Pinustropicalis* Morelet para la EFI la palma. (Tesis presentada en opción al título de doctor en Ciencias Forestales. UPR).
- Alder, D. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: Commonwealth Forestry Institute, Reino Unido. FAO. FAO # 22 Vol.2. Editorial Argón. 118 pp.
- Barrio, M.; Sixto, H.; Cañellas, I.; González, F. (2007). Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 16(1), 65-75. Disponible on line en <http://www.inia.es/srf> ISSN: 1131-7965
- BI H., Turner J., 1994. Long term effects of superphosphate fertilization on stem form, taper and stem volume estimation of *Pinus radiata*. For. Ecol. Manage., 70, 285-297.
- Bruce R., Curtis L., Van Coevering C., (1968). Development of a system of taper and volume tables for red alder. For. Sci., 14, 339-350.
- Calliez, A. (1980). Predicción del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los Trópicos. Predicción del rendimiento. Volumen 22. FAO. Roma.
- Cao, Q.V.; Burkhardt, H. E; Max, T.A. (1980). Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. Forest Science. (26), 71-80.
- Flinn D.W., (1984). Practical aspects of the nutrition of exotic conifer plantations and native eucalypt forest in Australia. In: J.J. Landsberg and W. Parsons. Proc. CSIRO Forest Research Division Conference, 21-25 may. Camberra, Australia. 296pp
- Furnival, G. (1961). An index for comparing equations used in constructing volume tables. Forest Science 7 (4), 337-341.
- Gezan, S. A.; Moreno, P.C; Ortega, A (2009): Modelos fustales para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. ISSN 0717-9200 Disponible en: <http://scielo.php.htm>
- Gordon, A. y Graham, J.D. (1986). Changes in *Pinus radiata* stem form in response to nitrogen and phosphorus fertilizer. N.Z.J. For. Sci; 16(1), 41-54.
- INFORA (1984). Modelos fustales para plantaciones de Forestal Mininco. Informe de circulación restringida.
- INFORA (1985). Modelos fustales para plantaciones de pino insigne de Forestal Arauco_Concepción. Informe de circulación restringida.

- Jokela E.J., Harding R.B., Nowak C.A., (1989). Long-term effects of fertilization on stem form, growth relations and yield estimates of slash pine. *For. Sci.*, 35, 832-842
- Kozak, A. (1988). A variable-exponent taper equation. *Can. J. For. Res.*; (18): 1363-1398.
- Max, T. y Burkhart, H. (1976). Segmented polynomial regression applied to taper equations. *Forest Science.* (22): 283-289.
- Novo, N.; Rojo, A.; Álvarez J.G. (2003). Funciones del perfil del fuste y tarifas de cubicación con clasificación de producto para el *Pinus silvestrys*, Galicia, España. Universidad de Santiago de Compostela.
- Prodan M.; Peters R.; Cox F.; Real, P. (1997). *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Proyecto IICA/GTZ sobre agricultura, recursos naturales y Desarrollo Sostenible.* San José, Costa Rica. 561pp.
- Real, P. (1993). Funciones de ahusamiento, Zonas 1, 2, 4, 6 y 7. Proyecto Modelo Nacional de Simulación de Pino radiata. Fundación Chile, Documento de trabajo (14), 25 pp.
- Rodríguez, F. y Molina, C (2003): Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de la cilíndricidad para tres clones de chopo (*Populus xeuramericana*) en Navarra. *Invest. Agrar: Sist. Recur. For.* 12(3), 73-85.
- Salas C., Nieto Laura Irisarri A (2005): Modelos de volumen para *Pinus pinaster* Ait. en la Comarca del Baixo Miño, Galicia, España; Volume equations for *Pinus pinaster* Ait. in the Baixo Miño region, Galicia, Spain. *Quebracho Revista de ciencias Forestales.* Argentina. 2-11p.
- Tepper H.B., Wilcox H.E., Valentine, F.A., (1968). The effects of fertilization and depth to ground water on wood deposition in red pine. *For. Sci.*, 14, 2-6
- Valinger E (1992). Effects of thinning and nitrogen fertilization on stem growth and stem form of *Pinus sylvestris* trees. *Scand. J. For. Res.*, 1, 219-228

Aceptado: abril 2012

Aprobado: mayo 2013

DrC. Hector Barrero Medel. Centro de Estudios Forestales. Universidad de Pinar del Río.
Martí 270 final, Pinar del Río, Cuba.
Correo electrónico: hbarrero@af.upr.edu.cu