

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL VOLUMEN POR HECTÁREA DE *PINUS CARIBAEA* MORELET VAR. *CARIBAEA* BARRET Y GOLFARI EN LA EMPRESA FORESTAL INTEGRAL LA PALMA

MATHEMATICAL MODELLING IN VOLUME PER HECTARE OF *PINUS CARIBAEA* MORELET VAR. *CARIBAEA* BARRETT AND GOLFARI AT THE INTEGRAL FORESTA ENTERPRISE LA PALMA

DR. C. JOSÉ ANTONIO BRAVO-IGLESIAS,¹ DRA. C. JUANA TERESA SUÁREZ-SARRIA,¹ ING. JUAN MIGUEL MONTALVO-GUERRERO,¹ ESP. MANUEL VALLE-LÓPEZ¹ E ING. ROBERTO VALDÉS-ROJA²

¹ Instituto de Investigaciones Agro-Forestales. Calle 174 no. 1723 e/ 17B y 17C, Siboney, Playa, La Habana, bravo@forestales.co.cu

² Empresa Forestal Integral La Palma. Carretera La Jibara, Km 1^{1/2}, Pinar del Río, Cuba

RESUMEN

La modelación matemática constituye una herramienta muy útil para la planificación y gestión de los ecosistemas forestales. Con el objetivo de predecir el comportamiento del volumen por hectárea en plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari de la Empresa Forestal Integral La Palma, se evaluaron siete modelos de regresión no lineal. El modelo que mejor bondad de ajuste presentó para el volumen por hectárea fue el de Hossfeld I, con un coeficiente de determinación del 58,7 %, y dos parámetros de alta significación. Se presentan las curvas que describen la evolución en el tiempo del Incremento Medio Anual (IMA), y el Incremento Corriente Anual (ICA) de dicha variable.

Palabras claves: *Pinus caribaea*, modelos matemáticos, volumen

ABSTRACT

Mathematical modelling constitutes a very useful tool for the planning and administration of the forest ecosystems. With the objective of predict the behavior of volume by hectare of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari plantations at La Palma Integral Forest Enterprise, seven non-linear regression models were evaluated. The best goodness of fit model was the volume per hectare was the one designed by Hossfeld I, with a determination coefficient of 58,7% with a high significance parameter. The description curves for the annual mean Increment with the Time (IMA) and the Annual Periodical Increment (ICA) of this variables were provided.

Key words: *Pinus caribaea*, mathematical models, volume

INTRODUCCIÓN

Los pinos y pinares juegan un papel muy importante en la economía forestal y nacional de Cuba debido a su uso universal [Samek, 1967]. La importancia de los pinos está subrayada más aún por el crecimiento relativamente rápido y el porcentaje elevado de su utilización debido al fuste recto. Según este autor, la explotación irracional y otros trata-

mientos inadecuados como el pastoreo incontrolado, el fuego y la erosión causaron y aún causan una disminución del incremento de los pinos.

Los modelos de crecimiento son cruciales para la planificación del manejo forestal a cualquier nivel, dentro del cual proyectar el incremento y rendimiento de los rodales indi-

viduales es un prerrequisito [Madrigal *et al.*, 2004]. También son de interés para realizar análisis financieros, para explorar opciones de manejo y alternativas silvícolas, para examinar los impactos del manejo forestal y de la cosecha sobre otros valores del bosque, y para determinar un régimen de manejo que maximice el volumen maderable o el valor de la producción [Klepac, 1983].

El objetivo de este trabajo fue modelar el crecimiento del volumen por hectárea de *Pinus caribaea* Morelet *var. caribaea* Barret y Golfari en la Empresa Forestal Integral La Palma

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Empresa Forestal Integral La Palma, en el municipio de igual nombre, situado en el centro-norte de la provincia de Pinar del Río. Tiene una extensión total de 621,43 km², incluyendo 7,51 km² de los cayos. Limita al norte con el Océano Atlántico, al sur con los municipios de Consolación del Sur y Los Palacios, al este con el municipio de Bahía Honda, al sureste con el municipio de San Cristóbal y al oeste con el municipio de Viñales. Los tipos de suelos presentes son ferrítico púrpura, ferralítico rojo, ferralítico rojo lixiviado, ferralítico cuarcítico amarillo rojizo lixiviado, ferralítico rojo pardusco ferromagnesial, ferralítico pardo rojizo, pardo sin carbonatos, pardo con carbonatos, aluvial, esquelético y cenagoso. La temperatura media es de 24,5 °C y con una precipitación anual de 1842,7 mm [Ministerio de la Agricultura, 2002].

Entre 2007 y 2010 se muestrearon rodales de *Pinus caribaea* Morelet *var. caribaea* Barret y Golfari en un rango de edad entre cinco y treinta y ocho años. Se levantaron 299 parcelas temporales de 500 m², tomándose los diámetros de todos los árboles a 1,30 m sobre el nivel del suelo, y las alturas de dos árboles por cada clase diamétrica, con cuya información se calculó el volumen por hectárea para cada rodal. Para el levantamiento del área y toma de los datos dasométricos se utilizó la cinta métrica de 50 m, cinta diamétrica, brújula, hipsómetro de Suunto, GPS y machete.

Se evaluaron siete modelos de crecimiento reportados por la literatura [Prodan *et al.*, 1997; Casañas, 2000; Sánchez Rodríguez, 2001 y Kiviste *et al.*, 2002].

$$\text{Hossfeld I} \quad y = \frac{t^2}{(a + bt + ct^2)}$$

$$\text{Strand} \quad y = \left[\frac{t}{a + bt} \right]^3$$

$$\text{Hossfeld IV} \quad y = \frac{t^c}{a + bt^c}$$

$$\text{Yoschida I} \quad y = \frac{t^c}{a + bt^c} - d$$

$$\text{Terazaki} \quad y = e^{a - \frac{b}{t}}$$

$$\text{Hossfeld I (modificado)} \quad y = \frac{t^2}{(a + bt)^2}$$

$$\text{Smalian} \quad y = \frac{t}{(a + bt + ct^2)}$$

Donde: a , b , c , d son los parámetros a estimar y t es el tiempo o edad de los rodales.

Se consideraron algunos de los criterios estadísticos desarrollados por Kiviste *et al.* (2002), Guerra *et al.* (2003) y Torres y Ortiz (2005) para la selección del modelo de mejor ajuste: coeficiente de determinación (R^2), error estándar de la estimación, sesgo, error medio cuadrático (CME), error medio en valor absoluto (EMA) y estadístico d de Durbin-Watson.

Se calculó el Incremento Corriente Anual (ICA) y el Incremento Medio Anual (IMA), según Prodan *et al.* (1997).

El análisis de la información se realizó con ayuda de los programas estadísticos Statgraphics Plus versión 5.1 e Infostat versión 1.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores estadísticos que se observan en la *Tabla 1* son similares para todos los modelos; sin embargo, el modelo de Hossfeld I presentó valores de coeficiente de determinación, coeficiente de determinación ajustado y Durban-Watson similar al modelo Hossfeld IV; pero mostró una menor desviación con respecto a los valores observados, mayor precisión de las estimaciones y un menor error medio en valor absoluto, con dos parámetros significativos ($p < 0,001$).

TABLA 1
Estadísticos de ajuste y estimaciones de los parámetros de los modelos para el volumen por hectárea

Modelo	R ²	R ² aj	Sesgo	CME	EMA	Durban-Watson	a	b	c	d
Hossfeld I	58,7	58,4	0,0080	771,37	23,21	1,26	1,0329 ± 0,2536 ***	-0,0359 ± 0,0277 NS	0,0066 ± 0,0007 ***	-
Hossfeld I (modificado)	56,5	56,3	-0,4365	810,31	24,34	1,19	0,4587 ± 0,0309 ***	0,0648 ± 0,0015 ***	-	-
Hoosfeld IV	58,7	58,4	0,0168	771,97	23,23	1,26	1,6273 ± 1,1044 NS	0,0060 ± 0,0003 ***	2,3524 ± 1,7835 ***	-
Strand	56,9	56,8	-0,3606	801,06	24,15	1,21	0,6799 ± 0,0449 ***	0,1632 ± 0,0023 ***	-	-
Terazaki	57,7	57,6	-0,1936	785,67	23,78	1,23	5,3771 ± 0,0339 ***	9,9841 ± 0,6302 **	-	-
Yoschida I	58,1	57,7	0,0048	784,04	23,53	1,25	0,0197 ± 0,0907 NS	0,0028 ± 0,0034 NS	1,1447 ± 0,9675 NS	154,679 ± 376,027 NS
Smalian	58,5	58,2	-0,1950	774,94	23,40	1,25	01592 ± 0,0194 ***	-0,0044 ± 0,0019 ***	0,0002 ± 0,00004 ***	-

*** $p < 0,001$

** $p < 0,01$

* $p < 0,05$

NS- $p > 0,05$

En la Fig. 1 refiere el comportamiento de los datos ajustado por el modelo de Hossfeld I. Se observa la gran dispersión de los valores observados por edad, siendo la razón de los valores que se presentan de los coeficientes

de determinación; aproximadamente a los treinta años de edad se forma una meseta, indicando una estabilidad del crecimiento en el tiempo, dado por el estado adulto o de madurez de la plantación.

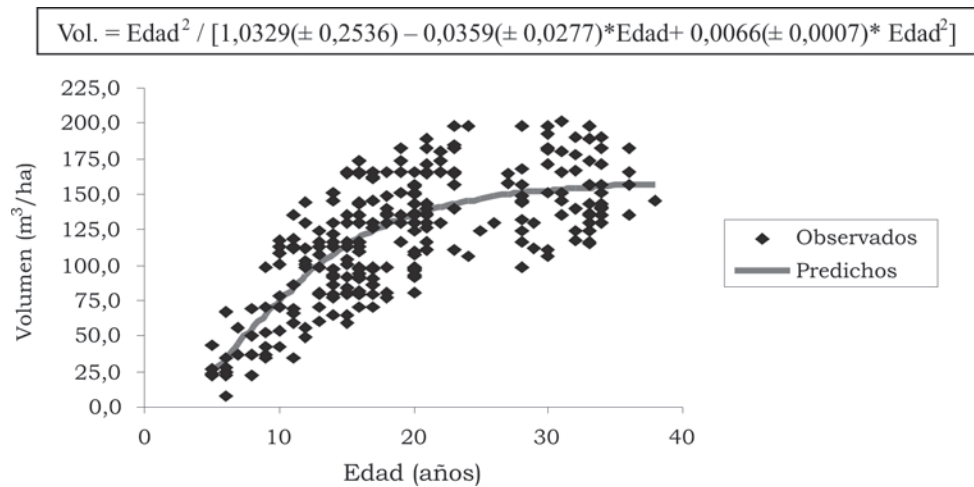


Figura 1. Modelo Hossfeld I ajustado al volumen por hectárea.

En la Fig. 2 se muestran el comportamiento del Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) a través del modelo Hossfeld I. Se observa que se produce un punto de inflexión

a los siete años de edad, igualándose el ICA e IMA a trece años, con una tasa de crecimiento de 7,35 m³/ha/año, momento en el que la especie manifiesta todo su potencial.

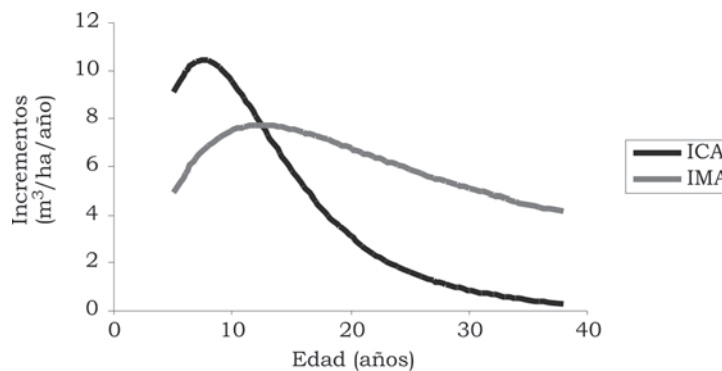


Figura 2. Incrementos en volumen por el modelo de Hossfeld I.

Las plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la Empresa Forestal Integral La Palma no han sido manejadas de forma inadecuada. Esta situación se evidencia en los volúmenes por hectárea

que muestran los rodales a una misma edad, independientemente de las condiciones de sitio, debido por no haberse realizados los tratamientos silvícolas en el momento oportuno, y la extracción de árboles no se ha efec-

tuado para favorecer los mejores individuos con el fin de lograr mayores incrementos.

CONCLUSIONES

- Se describió la dinámica de crecimiento en plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la Empresa Forestal Integral La Palma a través del modelo Hossfeld I. La evaluación en el tiempo del ICA e IMA mostró que estos se igualan a los trece años con una tasa de crecimiento de 7,35 m³/ha/año.
- Los volúmenes por hectárea que muestran los rodales a una misma edad evidencia que las plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari han sido manejadas de forma inadecuada.

BIBLIOGRAFÍA

- CASAÑAS, N. 2000. *Pinus pinea* L. en el Sistema Central (Valles del Tiétar y del Alberche): «Desarrollo de un modelo de gestión y producción de piña». España. 356 h. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas). Universidad de Madrid.
- GUERRA, C. W., CABRERA, A., FERNÁNDEZ, L. 2003. «Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica». *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* (CU) 37(1):3-10.

KIVISTE, A., ÁLVAREZ, J. G., ROJO, A., RUÍZ, A.D. 2002. *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. España. Instituto de Investigaciones y Tecnología Agraria y Alimentaria. 190 p.

KLEPAC, D. 1983. *Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales*. México. Universidad Autónoma Chapingo. 365 p.

MADRIGAL, S., MORENO, J., VÁZQUEZ, I. 2004. «Comportamiento de dos métodos en la predicción y representación gráfica del índice de sitio». revista *Ciencia Forestal en México* (MX) 29(95): 23-41. enero-julio.

MINISTERIO DE LA AGRICULTURA. 2002. *Proyecto de Organización y Desarrollo de la Economía Forestal de la Empresa Forestal Integral La Palma. Provincia Pinar del Río. Cuba*. Grupo Empresarial de Agricultura de Montaña. Instituto de Investigaciones Forestales. 147 p.

PRODAN, M., PETERS, R., COX, F., REAL, P. 1997. *Mensura forestal*. Proyecto IICA BMZ / GTZ, Sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. Costa Rica. 561 p.

SAMEK, V. 1967. *Elementos de silvicultura de los pinares. Cuba*. Academia de Ciencias de Cuba. 102 p.

SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, F. 2001. «Estudio de calidad de estación, crecimiento, producción y silvicultura de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. España». 356 h. Tesis (en opción al grado científico en Doctor en Ciencias Agrícolas). Universidad de Santiago de Compostela.

Software estadístico Statgraphics Plus versión 5.1 sobre Windows, 1995.

Software estadístico Infostat versión 1.0.

TORRES, V., ORTIZ, J. 2005. «Aplicaciones de la modelación y simulación en la producción y alimentación de animales de granja». *Revista Cubana Ciencia Agrícola* (CU) 39. Número Especial.

RESEÑA CURRICULAR

Autor principal: José A. Bravo Iglesias

Doctor en Ciencias Forestales, investigador auxiliar del Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, trabaja en la temática de Silvicultura y Medio Ambiente, y Biometría Forestal. Profesor instructor, ha impartido cursos de posgrado sobre Silvicultura, Agroecología y Diseño Experimental, entre otros. Recibió premio en el Forum Tecnológico Especial. Ha participado en eventos nacionales e internacionales.