

**ECUACIONES PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO E
INCREMENTO EN BIOMASA TOTAL EN PLANTACIONES
FORESTALES DE DURANGO, MEXICO**

José Návar, Nicolás González y David Maldonado
Programa de M.C. Forestales,
FCF-UANL Facultad de Ciencias Forestales,
UANL, México

E:mail: jnavar@ccr.dsi.uanl.mx

RESUMEN

En este reporte de investigación se presentan tres modelos convencionalmente usados para estimar el crecimiento de la biomasa total de plantaciones forestales de Durango, México. Se ajustaron modelos al nivel del rodal (2) y al nivel de árboles individuales (1) a 18 parcelas y se validaron con cinco parcelas plantadas con *P. durangensis*, *P. cooperi* O, *P. cooperi* B., *P. engelmannii* y *P. arizonica*. El modelo al nivel de los árboles individuales predijo mejor el crecimiento en biomasa total y por esta razón se recomienda su utilización preliminar en la estimación de la biomasa total y sus atributos secundarios.

Palabras clave: Sierra Madre Occidental, Modelos al nivel del Rodal y Arboles Individuales independientes de la distancia, Weibull.

INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha dado considerable atención a la estimación de biomasa de árboles individuales y rodales forestales. Se han desarrollado ecuaciones que relacionan la biomasa o sus componentes (raíces, hojas, ramas y fustes) con las características dasométricas de los árboles (Bakersville, 1965; Pastor and Bockheim, 1981; Agee, 1983). En la actualidad existen ecuaciones de biomasa desarrolladas o compiladas para bosques tropicales y templados (Schroeder *et al.*, 1997; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Brown *et al.*, 1989). Sin embargo, los modelos de crecimiento en biomasa son escasos en la literatura científica.

Los estudios sobre el crecimiento en biomasa tienen como finalidad entender los ciclos de la energía y de los nutrientes. También se están usando para observar el efecto de la vegetación en el ciclo global del CO₂ (Brown, 1997). Algunos modelos de CO₂ (e.g., Makela, 1997; Mohren, 1994) incluyen la estimación del volumen como el atributo principal de la biomasa y algunos de sus componentes o parámetros relacionados para establecer los flujos de este gas entre la vegetación, el suelo y la atmósfera. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue reportar las tecnologías matemáticas disponibles para estimar los componentes de biomasa en dos comunidades vegetales contrastantes del norte de México.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo de campo para desarrollar los modelos de crecimiento en biomasa se realizaron en el municipio de Pueblo Nuevo del estado de Durango, México. Se estudiaron plantaciones forestales de cinco especies: *P. durangensis* M, *P. cooperi* O, *P. cooperi* B, *P. engelmannii* C, y *P. arizonica*. En total se estudiaron 23 parcelas plantadas en diferentes tiempos desde 1978 hasta 1994 en áreas incendiadas o plagadas, con coberturas espaciales de menos de 12 ha.

El área de estudio se ubica en el municipio de Pueblo Nuevo, al sudeste del estado de Durango, México, en el maciso principal de la Sierra Madre Occidental. El clima predominante del área es templado o semifrío subhúmedo, con lluvias veraniegas que ascienden a los 1200 mm anuales, con una temperatura promedio anual de 11.7°C. Los suelos son predominantemente cambisoles, litosoles y regosoles, con profundidades que no exceden los 30 cm. La vegetación nativa se caracteriza por ser bosques mixtos e irregulares de pino-encino.

Las características dasométricas de las parcelas estudiadas se reportan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros dasométricos promedio de especies típicas del Matorral Espinos Tamulipeco del nordeste de México y de coníferas de la Sierra Madre Occidental del norte de México.

Especies	DB (cm)	H (m)	RCopa (m)	Edad (años)	Densidad No ha ⁻¹	
					Inicial	Edadt
LE1: <i>P. durangensis</i>	12.24	8.15	1.0.3	21	6667	4667
LE2: <i>P. arizonica</i>	10.60	5.78	1.04	21	6667	4217
LE3: <i>P. cooperi</i>	15.52	7.34	1.18	21	6667	1900
LE4: <i>P. arizonica</i>	9.55	4.61	-	21	6667	5500
LE5: <i>P. cooperi</i>	15.69	9.77	-	21	6667	2450
LE6: <i>P. cooperi</i>	15.93	8.63	1.27	21	6667	2882
LE7: <i>P. durangensis</i>	14.77	7.23	1.24	21	6667	3138
LE8: <i>P. durangensis</i>	14.84	8.91	1.22	21	6667	3090
LE9: <i>P. cooperi</i>	10.19	4.81	0.97	21	6667	3100
SA1: <i>P. durangensis</i>	16.27	6.06	1.25	17	2500	1867
SA2: <i>P. durangensis</i>	20.31	7.20	0.90	17	1111	689
SA3: <i>P. durangensis</i>	17.56	6.41	1.45	17	1600	1444
SA4: <i>P. durangensis</i>	14.43	6.14	1.94	17	4444	2633
PI1: <i>P. cooperi B</i>	14.00	3.63		18	2500	1633
AL1: <i>P. durangensis</i>	15.68	7.30	1.09	16	5000	2233
AL2: <i>P. cooperi</i>	11.03	5.83	1.65	16	5000	1817
SP1: <i>P. engelmannii</i>	11.16	2.87	1.06	10	2500	1617
SP2: <i>P. cooperi</i>	8.69	2.66	1.21	10	2500	1867
SP3: <i>P. durangensis</i>	8.41	2.81	1.38	10	2500	2133
LB1: <i>P. engelmannii</i>	5.61	2.80	0.59	11	10000	3575
LB2: <i>P. cooperi</i>	10.55	5.84	1.11	11	10000	4950
LC1: <i>P. durangensis</i>	6.32	2.26	1.29	7	2500	1767
LC2: <i>P. cooperi</i>	4.97	1.74	1.10	7	2500	1950

DB= Diámetro basal (cm); rCopa= radio promedio de la copa (m)

Las especies estudiadas se usan tradicionalmente como trocería, postes, pilotes, muebles, combustible.

Muestreo

En cada una de las parcelas se aislaron sitios temporales de muestreo de 20x30 m, dentro de las cuales se midieron y cuantificaron todos los individuos presentes. Las medidas realizadas incluyeron el diámetro a la base (DB), la altura total (H) y la cobertura dada por la medición de un radio o un diámetro de copa y ajustada a la superficie de un círculo (COB). Además se cortaron 56 árboles para realizar los estudios de análisis troncales y biomasa, los cuales consistieron en separar los componentes ramas, hojas y fustes. Estos árboles se midieron también en sus características dasométricas mencionadas y además se les tomó el diámetro a cada 0.5 m del fuste hasta la parte distal. Se cortaron rodajas para los análisis troncales. Las muestras de biomasa se pesaron, se colectaron muestras previamente pesadas y secadas en el laboratorio por 100°C por 24 horas y vueltas a pesar. Los individuos se seleccionaron cubriendo el rango de características dasométricas y cortados dentro de un período no mayor a 2 meses para que la biomasa sobre todo foliar no mostrara variaciones temporales. Este procedimiento ha sido recomendado por Monserud *et al.* (1996) y Marklund (1983).

Procedimiento

Primero se ajustaron ecuaciones para estimar la biomasa de los árboles individuales cortados. Las ecuaciones comúnmente usadas tienen formas simples lineales, simples no lineales, lineales múltiples y no lineales múltiples (Clutter *et al.*, 1983). En este trabajo se ajustaron dos tipos de ecuaciones que reúnen los requisitos de aditividad descritos por Cunia y Briggs (1985); Reed y Green (1985) y Parresol (1999), donde la aditividad de los componentes se asegura por el uso de la misma variable independiente o se define como la función de la suma de cada una de las mejores regresiones individuales de cada componente en biomasa. La evaluación de las ecuaciones se realizó por medio de los estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación, r^2 , el error estándar, S_x y el coeficiente de variación, CV. La ecuación seleccionada y reportada en Nívar *et al.* (2001) es la siguiente:

Donde BT= biomasa total (kg), Db=diámetro basal (cm), H=altura total (m) y Cob=cobertura total (m²). La ecuación [1] no se redujo porque cada parte estima los componentes hojas, ramas y fustes, respectivamente. Esta ecuación se utilizó para estimar la biomasa total de cada árbol de cada parcela para conocer este parámetro al nivel espacial (1 ha).

Con los datos de biomasa total por hectárea, los atributos dasométricos de los árboles medidos de cada parcela, sus promedios por parcela, además de la edad de la plantación, el área basal, el índice de sitio, se procedió a ajustar los siguientes tres modelos de

rendimiento e incremento en biomasa. El primer modelo sigue el procedimiento de Clutter (1963) y Clutter *et al.* (1983) y es descrito en

Zepeda y Domínguez (1998), como sigue:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial AB}{\partial E} &= -AB \frac{[\ln(AB)]}{E} + c_1 \left(\frac{AB}{E} \right) \\
 \ln(AB_2) &= \left(\frac{E_1}{E_2} \right) * \ln(AB_1) + c_1 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \\
 \ln(BT) &= B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{E} + B_3 \ln(AB) \\
 Ho &= \frac{E^2}{B_0 + B_1 E + B_2 E^2} \\
 \frac{\partial BT}{\partial E} &= BT \left[\frac{-B_2}{E^2} \right] + B_3 \left(\frac{\partial AB}{\partial E} \right) \\
 \ln(BT_2) &= B_0 + B_1 IS + \frac{B_2}{E_2} + B_3 \left(\frac{E_1}{E_2} \right) * \ln(AB) + B_4 \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right) \quad [2]
 \end{aligned}$$

Donde E=edad (años), AB= área basal (m²), BT= biomasa total (Mg ha⁻¹), IS= índice de sitio, c, B₀, B₁, B₂, B₃, son parámetros estadísticos.

El modelo de rendimiento e incremento en biomasa total se basa en el ajuste y predicción de parámetros de la distribución weibull al nivel del rodal y su teoría se describe a continuación.

$$BT = f(Db, H, Cob) * N$$

$$N_2 = N_1 \left[\frac{E_2}{E_1} \right]^{B_0} \text{Exp} \left[(B_1 - B_2 I S)(E_2 - E_1) \right]$$

$$N_{2CDI} = f(X) = \frac{a}{b} \left[\frac{x-e}{b} \right]^{a-1} \text{Exp} - \left[\frac{x-e}{b} \right]^a CD$$

$$a = f(Db, Dq, AB, H, Ho)$$

$$b = f(Db, Dq, AB, H, Ho)$$

$$e = f(Db, Dq, AB, H, Ho) \quad [3]$$

Donde: D_q = diámetro cuadrático promedio (cm), H_o = altura dominante (m), $\alpha, \beta, \varepsilon$ parámetros de forma, escala y posición de la distribución weibull.

El modelos para árboles individuales basó su teoría en la ecuación [4]:

$$BT = f(Db, H, Cob) * N$$

$$Db_{ei} = f(E) = Db_1 * B_0(1 - \exp(B_1 E))^{B_2}$$

$$H_{ei} = f(E) = Db_1 * B_0(1 - \exp(B_1 E))^{B_2} \quad [4]$$

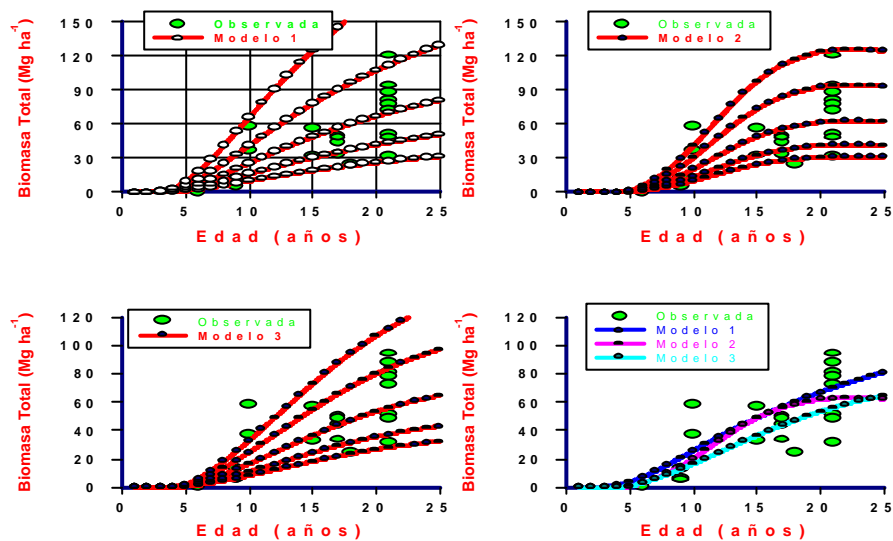
Donde: Db_{ei} y H_{ei} = Diámetro a la base (cm) y Altura total (m) a la edad i de la masa; B_0 , B_1 y B_2 = parámetros estadísticos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Modelo 1 al nivel del Rodal 1. Los estadísticos de ajuste del modelo 1 mostraron que el área basal se puede predecir con la menor precisión ($r^2=0.35$, $S_x=10.7m^2 ha^{-1}$; $S_x(\%)=63\%$) con parámetro $c=3.1797$. Este parámetro de incremento en biomasa es un tanto bajo en contraste con aquel reportado para las plantaciones esteafricanas (Alder, 1979) y de bosques nativos del norte de México (Zepeda y Domínguez, 1998). En contraste, el modelo para predecir la biomasa total tuvo una mejor eficiencia ($r^2=0.95$, $S_x=9.1m^3 ha^{-1}$; $S_x(\%)=19\%$). En la Figura 1 se muestra el crecimiento en biomasa total, de donde se desprende la cobertura tan amplia en crecimiento en biomasa por los índices de sitio. En este caso se detectó que las parcelas con *P. durangensis* y *P. cooperi* prefirieron suelos bien drenados, con exposiciones zenitales o las derivadas del norte. Las plantaciones de *P. arizonica* y una plantación de *P. cooperi* mostraron rendimientos muy bajos en biomasa, porque la primera especie pertenece a un rango de distribución un poco mas al norte del estado. Otras plantaciones con especies como *P. engelmannii* estan desarrollando bien a pesar de encontrarse fuera de la zona de distribución.

Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo al rendimiento en biomasa total reportaron los siguientes valores $r^2=0.58$, $S_x=24.2 Mg ha^{-1}$ y $CV=50\%$. Para las parcelas de validación del modelo estas estadísticas cambiaron a $r^2=0.20$, $S_x=15.3 Mg ha^{-1}$ y $CV=35\%$.

Figura 1. Los modelos de rendimiento e incremento en biomasa total para plantaciones forestales de del estado de Durango, México.



Modelo 1 al nivel del Rodal 2. El modelo al nivel del rodal2 o de la distribución weibull

Figura 1 Los modelos de rendimiento e incremento en biomasa total para plantaciones forestales de del estado de Durango, México. tiende a estimar adecuadamente la biomasa total hasta 15 años y posteriormente alcanza un estadio constante no característico de las curvas de rendimiento (Figura 1). Este artificio matemático se debe a la estimación de los parámetros de la distribución weibull, donde en plantaciones mayores que 17 años ya no ocurren desplazamientos significativos en las distribuciones diamétricas. Los modelos de predicción de la altura en función de la edad también pudieron alcanzar un estadio constante y subestimar la biomasa total en la etapa final.

Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo al rendimiento en biomasa total fueron mejores que aquellos reportados para el modelo 1 con $r^2=0.79$, $S_e=16.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $CV=35\%$. Para las parcelas de validación del modelo estas estadísticas también mejoraron con valores de $r^2=0.22$, $S_e=14.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $CV=32\%$.

Modelo 1 al nivel de los Árboles Individuales. El modelo al nivel de los árboles individuales por el contrario crece a una tasa similar a aquella mostrada por el modelo 1. El modelo 3 predice adecuadamente la biomasa de las parcelas en todo el rango de observaciones, con la excepción de la parcela denominada Los Bancos, donde se plantó la especie *P. cooperi*. El crecimiento futuro no es tan pronunciado como aquella tendencia mostrada por el modelo 1 y tampoco alcanza una constante tan rápido como el modelo 2. Estas observaciones se pueden apreciar en la Figura 1, grafica 4.

Los estadísticos de bondad de ajuste del modelo 3 fueron mejores que aquellos reportados para los modelos 1 y 2, con valores de $r^2=0.75$, $S_e=18.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $CV=37\%$. Para las parcelas de validación del modelo estas estadísticas también mejoraron con valores de $r^2=0.49$, $S_e=9.7 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $CV=22\%$. Los estadísticos de ajuste y validación de los tres modelos indicaron que la técnica de predicción al nivel del árbol individual provee los mejores estimadores del rendimiento e incremento de la biomasa total en las plantaciones probadas. Por esta razón se recomienda su utilización preliminar en la estimación de biomasa al nivel del rodal en las plantaciones forestales del estado de Durango, México.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ajustaron y validaron tres modelos de rendimiento e incremento de biomasa total en plantaciones forestales del estado de Durango, México. El modelo al nivel de los árboles individuales predice mejor el crecimiento en biomasa total y se recomienda su utilización preliminar para la estimación de la biomasa total y sus parámetros secuenciales.

RECONOCIMIENTOS

El CONACyT y PAICyT, financiaron este proyecto de investigación a través de los proyectos 28536-B y CN 323 00, respectivamente.

REFERENCIAS

- Alder, D. 1979. A distance-independent tree model for exotic conifer plantations in east Africa. *For. Sci.* 25: 59-71
- Agee, J.K. 1983. Field weights of understory-grown conifers in southern Oregon. *Can. J. For. Res.* 13: 648-656.
- Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In *Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Arbores.* Vol 1. Antalya Turkia 13-22 October of 1997.
- Brown, S., A. J. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4): 881-902.
- Baskerville, G.L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2: 49-53.
- Clutter, J.L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *For. Sci.* 9: 354-371.
- Clutter, J.L., J.C. Forston, L.V. Pienaar, G.H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. *Timber management: A quantitative approach.* Wiley, New York. 333 p.
- Cunia, T. and R.D. Briggs. 1985. Forcing additivity for biomass tables: use of the generalized least square method. *Can. J. For. Res.* 15: 23-28.
- Mákelá: A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in tree based on structural relationships. *For. Sci.* 43: 7-24.
- Marklund, L. 1983. Collecting data for biomass equation development: some methodological aspects. *Mesures des biomasses et des accroissements forestiers. Les Colloques de l'INRA Orleáns, France* 19: 37-43.
- Monserud, R., A. Onuchin, and N. Tchebakova. 1996. Needle, crown, stem, and root phytomass of *Pinus silvestris* stands in Russia. *Forest Ecology and Management* 82: 59-67.
- Mohren, F. 1994. CO₂ Fix Model. Institute of Forestry and Nature Research. Wageningen, Netherlands.
- Parresol, B. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45: 573-593.
- Pastor, J. and J.G. Bockheim. 1981. Biomass and production of an aspen mixed hardwood-spodosol ecosystem in northern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 11: 132-138.
- Reed, D. and E.J. Green. 1985. A method of forcing additivity of biomass tables when using nonlinear models. *Can. J. For. Res.* 15: 1184-1187.

- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey, and C. Cieszewski. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *For. Sci.* 43 (3) 424-434.
- Ter-Mikaelian, M.T. and M.D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- Zepeda Bautista, M.E. y Domínguez-Pereda, A. 1998. Niveles de incremento y rendimiento maderable de poblaciones naturales de *Pinus arizonica* Engl., de El Poleo, Chihuahua.