

ESTIMACIÓN DE CARBONO ALMACENADO EN LA REGENERACIÓN NATURAL DE *Pinus durangensis* Martínez EN EL SALTO, DURANGO

Estimation of carbon stock in the natural regeneration of *Pinus durangensis* Martínez in El Salto, Durango

Palabras clave: biomasa, CO₂, componentes, crecimiento, modelos, volumen.

Key words: biomass, CO₂, components, growth, models, volume.

Eduardo Montes de Oca-Cano¹

Mauricio Rojas-Ascensión² / Pedro García-Ramírez³

Juan Abel Nájera-Luna⁴ / Jorge Méndez-González⁵

José de Jesús Graciano-Luna⁶

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo ajustar ecuaciones lineales y no lineales para estimar carbono, por componente de acículas, ramas, fuste y total. Los resultados indican que en el ámbito individual, el componente total muestra los mejores estadísticos de ajuste, mientras que las mayores variaciones se detectan en las ramas y en el fuste. Adicionalmente se analizan porcentajes de biomasa por componente donde se observa que el fuste aporta el 46.90% de la biomasa, las acículas el 35.60% y las ramas solamente el 17.30% de la biomasa total. Asimismo, dentro de este rango de edad, la biomasa en el fuste aumenta anualmente 2.96%, la biomasa en las acículas disminuye 3.13% y la biomasa en las ramas aumenta 0.17%.

ABSTRACT

The aim of the present study was to adjust linear and non-linear equations in order to estimate the carbon component of leaves, branches and entire trees. The results indicate that at the individual level, the total component shows the best adjustment

statistics, while major variation is detected in the branches and in the trunk. In addition an analysis of the percentages of biomass in each component indicates that the trunk accounts for 46.9% of the biomass, leaves 35.6% and the branches only 17.3%. Trunk biomass increases annually by 2.96%, leaf biomass decreases by 3.13% and branch biomass increases by 0.17%.

INTRODUCCIÓN

Las herramientas clásicas en el manejo forestal son los modelos de crecimiento, como tecnologías adecuadas en la estimación de variables de manejo, los modelos en el ámbito rodal predicen el rendimiento y la productividad por el pronóstico de los atributos del rodal como: área basal, densidad, volumen residual etc., el modelaje de crecimiento y la productividad puede ser constituido desde diferentes alternativas en el ámbito rodal del grupo de árboles o especies y en el ámbito del árbol individual (Clutter *et al.*, 1983) aspectos que se pueden aplicar a la estimación de biomasa y captura de carbono. El volumen representa la parte más importante de una masa forestal debido a que una

¹ Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Carretera a la Compañía Col. Tepetitlanapa. C.P. 95005, Zongolica. Veracruz, México. montesdeoca_cano@hotmail.com. Autor para correspondencia.

² Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Veracruz, México. mauricio_docente@itszongolica.edu.mx

³ Instituto Tecnológico de El Salto, Maestría en Ciencias en Desarrollo Forestal Sustentable. Durango, México. garp820203@hotmail.com

⁴ Instituto Tecnológico de El Salto. El Salto, Durango, México. jalnajera@yahoo.com.mx

⁵ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. jorgemendezgonzalez@gmail.com

⁶ Instituto Tecnológico de El Salto. El Salto, Durango, México. forestal@itelsalto.edu.mx

vez estimado se puede planificar el manejo actual y futuro de los bosques, así como la forma en que deberá desarrollarse dicho manejo. Actualmente es utilizado eficientemente dentro de proyectos de servicios ambientales, como captura de carbono y servicios hidrológicos (Morales & Ruiz, 2004). Para la estimación del crecimiento de los árboles se utilizan modelos matemáticos estadísticos que predicen el crecimiento de los individuos en un periodo determinado y sirve, en consecuencia, como elemento de apoyo para la planificación de intervenciones silvícolas (Cubillos, 1987). La presente investigación estudia los flujos y la asimilación (intercambio gaseoso) o fijación de CO₂ atmosférico, del ambiente a la planta, en la regeneración natural de *Pinus durangensis* Martínez de la región de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango.

Esta investigación tuvo como objetivo principal estimar biomasa para determinar carbono en los componentes de la regeneración natural de *P. durangensis* ajustando ecuaciones que permitan conocer estos importantes flujos como servicio ambiental. La hipótesis indica que la dinámica de captura de carbono es similar en los componentes foliar, ramal y fustal así como en las diferentes edades de la regeneración natural de *P. durangensis* de la región de El Salto, Durango.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio fue realizado en la región de El Salto Durango (México), inmerso en el Ejido denominado San Esteban y Anexos, se localiza en el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental dentro del municipio de Pueblo Nuevo, al suroeste del estado, su lugar de acceso es por la carretera Durango-Mazatlán en el kilometro 101.

TOMA DE MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS DESTRUCTIVO

Para la toma de muestras se seleccionaron 72 árboles de *P. durangensis* dentro del área de estudio, árboles libres de plagas y enfermedades, libres de

defectos tanto físicos como mecánicos, árboles que representaran las categorías diámétricas de altura y edad correspondientes a la etapa de regeneración. Se extrajeron un promedio de siete arbolitos por categoría de edad, desde tres hasta doce años. Se etiquetaron todas las muestras con una clave de identificación con el número de árbol, la categoría de edad y fecha. Una vez obtenidos los arbolitos, se pusieron en bolsas de plástico para evitar, por un lado, la pérdida de humedad excesiva y, por otro lado, conservar un orden para el análisis de datos.

A cada individuo se le midieron las siguientes variables dasométricas: edad (E) fue estimada mediante el número de verticilos que presentó cada árbol muestra; diámetro a la base del suelo (DB) y diámetro a 10 cm de la base del suelo (D) medidos mediante vernier; altura del fuste limpio (HF) y altura total (HT) obtenidas mediante cinta métrica; número de ramas (NR) se obtuvo mediante la cuenta del número de ramas realizada en forma visual; cobertura (CB) medida mediante cinta métrica.

PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO

Estimación de peso seco de los individuos

Cada árbol fue separado por sus componentes acículas, ramas y fuste, posteriormente cada componente fue pesado para obtener el peso fresco. Las muestras se introdujeron en una estufa de secado de tipo convencional perteneciente al Instituto de Producción y Enseñanza Forestal (INAFO), manteniendo la muestra a temperaturas superiores a los 75°C durante ocho días (Van Laar & Akca, 1997) y hasta tener el peso constante de cada componente (según muestras monitoreadas). El peso seco de cada uno de sus componentes de cada árbol, se obtuvo utilizando básculas con capacidades de 0.32, 10 y 25 kg con precisión de 0.001, 10 y 50 g respectivamente.

Estimación del carbono

Conocido el peso seco de cada componente de la regeneración natural de *P. durangensis* es posible determinar el contenido de carbono. Aunque el contenido de carbono en la especie puede variar

desde 40.27 hasta 46.29 e incluso más de 50% (Gayoso *et al.*, 2002), una ponderación específica e interespecífica de factores de contenido de carbono de raíces, fuste, ramas y acículas arroja una aproximación cercana al 50%, sugiriendo que cerca de la mitad del peso anhidro de sus constituyentes sólidos es equivalente a contenido de carbono. Este factor de conversión fue sugerido por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 1994) para estudios de captura de carbono. Esta consideración fue importante y tomada en cuenta para este estudio.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MODELOS

Los criterios utilizados para determinar el mejor modelo fueron la R^2 , el error estándar, coeficiente de variación, sesgo, F calculada, así como la probabilidad del modelo y de los parámetros de regresión. Otro criterio tomado en cuenta fue la parsimonia del modelo y número de variables consideradas (Tabla 1).

Tabla 1. Modelos utilizados para estimar el crecimiento en los diferentes componentes en *Pinus durangensis*. y = Diámetro (cm); Altura (cm); Carbono en acículas (g); Carbono en ramas (g); Carbono en fuste (g) y Carbono total (g); β_0 , β_1 , β_2 y β_3 : Parámetros estadísticos; exp: Base del logaritmo neperiano, x : edad (años)

Modelos	Ecuaciones
Blasdale-Nelder	$y = (\beta_0 + (\beta_1 * x))^{(1/\beta_2)}$
Exponencial de dos parámetros	$y = \exp(\beta_0 * (x - \beta_1))$
Exponencial de cuatro parámetros	$y = \beta_0 * \exp(-\beta_1 * x) + \beta_2 * \exp(-\beta_3 * x)$
Weibull	$y = \beta_0 - (\beta_0 - \beta_1) * \exp(-(\beta_2 * x)^{\beta_3})$
Gompertz	$y = \beta_0 * (\exp(-\exp(-\beta_1 * (x - \beta_2))))$
Logístico 3 parámetros	$y = \beta_0 / ((1 + \beta_1) * \exp(-(\beta_2 * x)))$
Polinomial	$y = \beta_0 + \beta_1 * x + \beta_2 * x^2 + \beta_3 * x^3$
Korf	$y = \beta_0 * \exp(-\beta_1 * (x * (-\beta_2)))$
Logístico 4 parámetros	$y = \beta_3 + (\beta_0 - \beta_3) / ((1 + \beta_1) * \exp(-(\beta_2 * x)))$
Parábola	$y = \beta_0 + (\beta_1 * x + (\beta_2 * x^2))$

RESULTADOS

En la tabla 2 se muestran los parámetros de los modelos probados para estimar el incremento en diámetro, altura, carbono en acículas, carbono en ramas, carbono en fuste y carbono total en la regeneración natural de *P. durangensis*.

Basados en el promedio de la R^2 de los diez modelos que se ajustaron en cada componente de la regeneración natural de *P. durangensis* se observa que los modelos se ajustan mejor al diámetro seguido por la altura, carbono total, carbono de las acículas, carbono de las ramas y finalmente el componente carbono en el fuste, esto es debido a la gran variación de tamaño y biomasa de fuste en las diferentes categorías de edad, al igual que la gran variación en la biomasa de ramas.

El mejor modelo que se ajustó para estimar el incremento en diámetro de *P. durangensis* fue el exponencial de dos parámetros presentando menor error (0.72) y mayor R^2 (82.52). El modelo que menos ajuste presentó en la estimación de crecimiento en diámetro fue el de Gompertz presentando mayor error (0.74) y menor R^2 (81.63).

El modelo que mejor ajuste presentó en el crecimiento en altura en la especie en regeneración natural de *P. durangensis* fue el polinomial de tercer grado, mostrando una R^2 de 76.149 y error de 33.336. Por otra parte, el modelo que menos ajuste presentó para determinar el crecimiento en altura fue el exponencial de cuatro parámetros presentando menor R^2 de 69.338 y mayor error de 37.797.

Para la determinación del incremento de carbono en las acículas el modelo que mayor ajuste presentó fue el de Gompertz presentando mayor R^2 de 73.104 y menor error estándar de 57.792. El modelo que menor ajuste tuvo en modelar el incremento de carbono en las acículas fue el de la parábola, presentando un menor R^2 de 72.375 y uno de los mayores errores (58.570).

El modelo el exponencial de dos parámetros fue el modelo que presentó mejor ajuste para la determi-

Tabla 2. Parámetros y estadísticos de ajuste de modelos de crecimiento en componentes en la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango. y = Diámetro (cm); Altura (cm); Carbono en acículas (g); Carbono en ramas (g); Carbono en fuste (g) y Carbono total (g); β_0 , β_1 , β_2 y β_3 : Parámetros estadísticos; exp: Base del logaritmos neperianos, x: Edad (años), R²: Coeficiente de determinación ajustado, CV: coeficiente de variación

V	Ecuaciones	R ²	Error	CV	Modelos
Diámetro	$y = ((0.991) + ((0.020) * x))^{(1 / (0.108))}$	82.554	0.731	20.57	Blasdale-Nelder
	$y = \exp((0.164) * (x - (-0.038)))$	82.522	0.726	20.44	Exponencial de dos parámetros
	$y = (0.488) * \exp(-(-0.164) * x) + (0.519) * \exp(-(-0.164) * x)$	82.522	0.737	20.75	Exponencial de cuatro parámetros
	$y = (-0.671) - ((-14.488) - (-13.009)) * \exp(-((0.352) * x) * (-0.392))$	82.609	0.741	20.86	Weibull
	$y = (18.454) * (\exp(-\exp(-(-0.099) * (x - (12.450))))))$	81.634	0.750	21.11	Gompertz
	$y = (0.678) / ((1 + (-0.326)) * \exp(-((0.164) * x)))$	82.522	0.731	20.60	Logístico de tres parámetros
	$y = (0.137) + (0.617) * x + (-0.058) * x^2 + (0.005) * x^3$	82.927	0.728	20.51	Polinomial de tercer grado
	$y = (1.006) * \exp(-(-0.404) * (x - (-0.407)))$	82.522	0.731	20.60	Korf
	$y = (-0.671) + ((1.029) - (-0.671)) / ((1 + (0.150)) * \exp(-((0.138) * x)))$	82.609	0.741	20.86	Logístico de cuatro parámetros
	$y = (0.881) + ((0.116) * x + ((0.032) * x^2))$	82.261	0.737	20.75	Parábola
Altura	$y = ((1.669) + ((0.103) * x))^{(1 / (0.193))}$	76.096	33.123	32.14	Blasdale-Nelder
	$y = \exp((0.210) * (x - (-14.229)))$	75.934	32.990	32.01	Exponencial de dos parámetros
	$y = (2.457) * \exp(-(-0.380) * x) + (61.407) * \exp(-(-0.034) * x)$	69.338	37.797	36.67	Exponencial de cuatro parámetros
	$y = (-21.657) - ((-10.600) - (-21.619)) * \exp(-((-1.711) * x) * (0.103))$	76.126	33.608	32.61	Weibull
	$y = (9974.033) * (\exp(-\exp(-(-0.048) * (x - (39.782))))))$	76.083	33.132	32.15	Gompertz
	$y = (2.057) / ((1 + (-0.897)) * \exp(-((0.210) * x)))$	75.934	33.235	32.25	Logístico de tres parámetros
	$y = (8.043) + (7.877) * x + (-0.103) * x^2 + (0.089) * x^3$	76.149	33.336	32.35	Polinomial de tercer grado
	$y = (19.954) * \exp(-(-0.438) * (x - (-0.480)))$	75.934	33.235	32.25	Korf
	$y = (-24.250) + ((28.508) - (-24.250)) / ((1 + (0.548)) * \exp(-((0.171) * x)))$	76.128	33.606	32.61	Logístico de cuatro Parámetros
	$y = (20.780) + ((-1.154) * x + ((1.574) * x^2))$	75.871	33.278	32.29	Parábola

Continúa

Tabla 2. Parámetros y estadísticos de ajuste de modelos de crecimiento en componentes en la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango. y = Diámetro (cm); Altura (cm); Carbono en acículas (g); Carbono en ramas (g); Carbono en fuste (g) y Carbono total (g); β_0 , β_1 , β_2 y β_3 : Parámetros estadísticos; exp: Base del logaritmo neperiano, x: Edad (años), R²: Coeficiente de determinación ajustado, CV: coeficiente de variación

V	Ecuaciones	R ²	Error	CV	Modelos
Carbono acículas	$y = ((0.760) + ((0.267) * x))^{(1/(0.233))}$	73.095	57.802	58.16	Blasdale-Nelder
	$y = \exp((0.355) * (x - (-4.762)))$	72.685	57.811	58.17	Exponencial de dos parámetros
	$y = (90.335) * \exp(-(-0.228) * x) + (-95.750) * \exp(-(-0.197) * x)$	73.031	58.307	58.67	Exponencial de cuatro parámetros
	$y = (-19.098) - ((-40.210) - (-30.398)) * \exp(-((-0.644) * x) * (0.477))$	72.982	58.807	59.17	Weibull
	$y = (6974.793) * (\exp(-\exp(-(-0.094) * (x - (23.609))))))$	73.104	57.792	58.15	Gompertz
	$y = (51.335) / ((1 + (8.483)) * \exp(-((-0.355) * x)))$	72.685	58.241	58.60	Logístico de tres parámetros
	$y = (2.573) + (4.838) * x + (-1.720) * x^2 + (0.318) * x^3$	73.051	58.285	58.65	Polinomial de tercer grado
	$y = (5.419) * \exp(-(-0.611) * (x * (-0.581)))$	72.685	58.241	58.60	Korf
	$y = (-19.099) + (8.513) - (-19.099) / ((1 + (1.814)) * \exp(-((-0.307) * x)))$	72.982	58.807	59.17	Logístico de cuatro parámetros
	$y = (53.215) + (-29.200) * x + ((4.405) * x^2)$	72.375	58.570	58.94	Parábola
Carbono ramas	$y = ((0.991) + ((0.008) * x))^{(1/(0.014))}$	73.033	57.388	78.26	Blasdale-Nelder
	$y = \exp((0.538) * (x - (0.776)))$	73.095	56.899	77.59	Exponencial de dos parámetros
	$y = (0.673) * \exp(-(-0.536) * x) + (-0.673) * \exp(-(-11.102) * x)$	73.094	57.755	78.76	Exponencial de cuatro parámetros
	$y = (3.988) - ((-787.300) - (-786.786)) * \exp(-((-0.821) * x) * (0.681))$	73.133	58.156	79.31	Weibull
	$y = (1766.170) * (\exp(-\exp(-(-0.202) * (x - (14.350))))))$	70.733	59.784	81.53	Gompertz
	$y = (0.361) / ((1 + (-0.457)) * \exp(-(-0.538) * x))$	73.095	57.322	78.17	Logístico de tres parámetros
	$y = (-27.292) + (34.695) * x + (-9.389) * x^2 + (0.776) * x^3$	71.509	59.433	81.05	Polinomial de tercer grado
	$y = (6.871) * \exp(-(-3.201) * (x * (-0.100)))$	64.443	65.897	89.86	Korf
	$y = (3.988) + (9.182) - (3.988) / ((1 + (9.091)) * \exp(-((-0.559) * x)))$	73.133	58.156	79.31	Logístico de cuatro parámetros
	$y = (96.334) + ((-48.396) * x + ((5.561) * x^2))$	66.910	63.570	86.69	Parábola

Continúa

Tabla 2. Parámetros y estadísticos de ajuste de modelos de crecimiento en componentes en la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango. y = Diámetro (cm); Altura (cm); Carbono en acículas (g); Carbono en ramas (g); Carbono en fuste (g) y Carbono total (g); β_0 , β_1 , β_2 y β_3 : Parámetros estadísticos; exp: Base del logaritmo neperiano, x: Edad (años), R²: Coeficiente de determinación ajustado, CV: coeficiente de variación

V	Ecuaciones	R ²	Error	CV	Modelos
Carbono fuste	$y = ((1.008) + ((0.008) * x))^{(1 / (0.015))}$	63.743	156.668	93.07	Blasdale-Nelder
	$y = \exp((0.507) * (x - (-1.442)))$	63.775	155.445	92.34	Exponencial de dos parámetros
	$y = (5.263) * \exp(-5.787 * x) + (2.074) * \exp(-(-0.507) * x)$	63.774	157.785	93.73	Exponencial de cuatro parámetros
	$y = (6.644) - ((-1.375) - (6.827)) * \exp(-(-3.282) * x) * (0.115)$	60.644	165.720	98.44	Weibull
	$y = (492979.000) * (\exp(-\exp(-0.070) * (x - (38.416))))$	63.457	157.286	93.43	Gompertz
	$y = (1.602) / ((1 + (-0.229)) * \exp(-(-0.507) * x))$	63.775	156.600	93.03	Logístico de tres parámetros
	$y = (-60.572) + (76.184) * x + (-20.213) * x^2 + (1.674) * x^3$	62.864	159.754	94.90	Polinomial de tercer grado
	$y = (2.077) * \exp(-(-0.709) * (x - (-0.715)))$	63.775	156.600	93.03	Korf
	$y = (5.897) + ((23.077) - (5.897)) / ((1 + (8.595)) * \exp(-((-0.519) * x)))$	63.789	158.960	94.43	Logístico de cuatro parámetros
	$y = (206.129) + ((-103.070) * x + (12.038) * x^2)$	59.003	166.596	98.96	Parábola
Carbono total	$y = ((1.034) + ((0.011) * x))^{(1 / (0.020))}$	75.263	226.711	66.47	Blasdale-Nelder
	$y = \exp((0.465) * (x - (-3.981)))$	75.290	224.913	65.95	Exponencial de dos parámetros
	$y = (6.374) * \exp(-(-0.465) * x) + (-6.373) * \exp(-(-7.985) * x)$	75.291	228.294	66.94	Exponencial de cuatro parámetros
	$y = (6.806) - ((-1.327) - (6.716)) * \exp(-((-1.318) * x) * (0.336))$	75.131	230.785	67.67	Weibull
	$y = (1059430.000) * (\exp(-\exp(-(-0.062) * (x - (42.045))))$	75.000	227.911	66.83	Gompertz
	$y = (186.776) / ((1 + (28.387)) * \exp(-((-0.466) * x)))$	75.290	226.585	66.44	Logístico de tres parámetros
	$y = (-85.291) + (115.716) * x + (-31.321) * x^2 + (2.768) * x^3$	74.573	231.587	67.90	Polinomial de tercer grado
	$y = (6.372) * \exp(-(-0.682) * (x - (-0.682)))$	75.290	226.585	66.44	Korf
	$y = (2.680) + ((46.642) - (2.680)) / ((1 + (6.124)) * \exp(-((-0.468) * x)))$	75.291	230.041	67.45	Logístico de cuatro parámetros
	$y = (355.679) + ((-180.666) * x + (22.004) * x^2)$	71.134	244.902	71.81	Parábola

nación del incremento de carbono en las ramas en la especie de *P. durangensis* de regeneración natural, registrando una de las mejores R^2 (73.096), menor error (56.899) así como menor coeficiente de variación. El modelo que menos ajuste presentó para estimar el incremento en carbono en ramas fue el de Korf presentando una menor R^2 (64.444), mayor error y mayor coeficiente de variación.

El modelo que mostró mejor ajuste en la estimación del incremento de carbono en el fuste en la regeneración natural de *P. durangensis* fue el exponencial de dos parámetros presentando una de las mejores R^2 , siendo de 63.775 y de menor error (155.445), así como menor coeficiente de variación, mientras que el modelo que menos ajuste presentó para modelar el incremento de carbono en el fuste de la especie estudiada fue el modelo de la Parábola, ya que los estadísticos de ajuste no fueron muy aceptables.

El incremento de carbono total en *P. durangensis* fue mejor explicado por el modelo Exponencial de dos parámetros por presentar la segunda mayor R^2 de 75.290 y un error de 224.913. Contrariamente el modelo que menos ajuste presentó para estimar esta variable fue el de la Parábola presentando el menor R^2 (71.134) y un mayor error (244.902).

En las figuras 1 y 2 se muestra el comportamiento de los modelos de crecimiento utilizando la edad como variable independiente para la estimación del incremento en diámetro, altura, carbono en acúculas, en ramas, en fuste y carbono total en la regeneración natural de *P. durangensis*.

Los puntos que se muestran en la figura 3 corresponden a la biomasa promedio (por componente) de siete árboles por categoría de edad, mientras que las líneas indican las tendencias a lo largo de la edad del árbol.

El porcentaje de biomasa promedio (35.64) que presentan las acúculas en el intervalo de edad de tres a doce años va de un máximo de 54.26% a un mínimo de 19.52%; presentando un coeficiente de variación de 28.89%. La grafica muestra que a medida que el árbol crece presenta una disminución

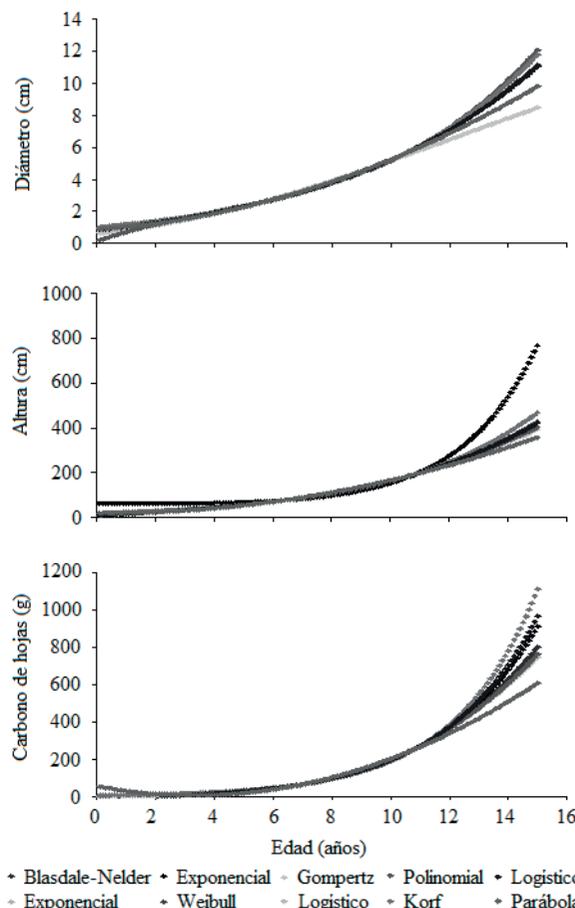


Figura 1. Incremento de diámetro, altura y carbono de acúculas, en función de la edad, en regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango

de biomasa en este componente de 3.14% por año, además, dicha tendencia puede ser explicada mediante regresión lineal simple (Tabla 3). En las ramas se presenta un porcentaje promedio de 17.38% de biomasa, variando desde 9.26% a un máximo de 25.25%, presentando un coeficiente de variación de 24.96 en el intervalo de tres a doce años. Contrariamente al componente acúculas, se observa que a medida que el árbol crece, el porcentaje de biomasa en ramas va aumentando (0.17% por año; Tabla 4).

En el fuste el porcentaje de biomasa promedio (46.95%) que se presenta en el intervalo de edad de tres a doce años cambia de un mínimo de 36.14% a un máximo de 63.53%, mostrando menor variación en este componente. La tendencia general indica que a medida que el árbol crece, el porcentaje de

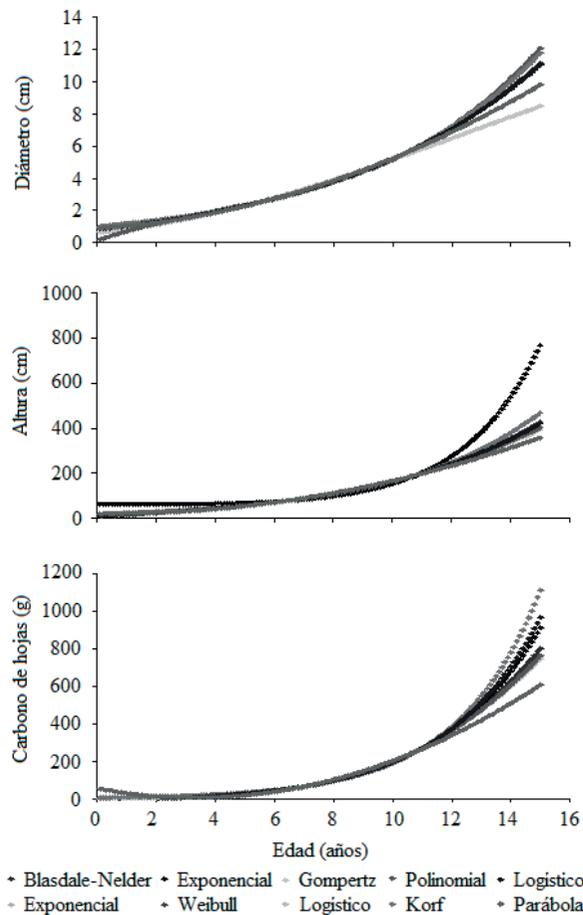


Figura 2. Incremento de carbono en ramas, fuste y total, en función de la edad, en regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango

biomasa se incrementa, la regresión lineal ajustada a estas observaciones indican que este incremento es del orden de 2.96% por año.

Tabla 3. Porcentaje de biomasa promedio por componente en la regeneración natural de *Pinus durangensis*, en la región de El Salto, Durango. DS: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; N: Numero de categoría de edad

Variables	Media	Max.	Min.	DS	CV	N
Biomasa de acículas	35.65	54.27	19.53	10.30	28.90	10
Biomasa de ramas	17.38	25.26	9.27	4.34	24.97	10
Biomasa de fuste	46.97	63.54	36.15	9.65	20.54	10

Tabla 4. Modelos para la determinación del porcentaje de biomasa por componente en la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango. y: Porcentaje de biomasa; x: Edad del árbol; R²: coeficiente de determinación; Sx: Error típico y N: Numero de observaciones

Variables	Ecuación	R ²	Sx	N
Biomasa de acículas	$y = -3.136x + 59.170$	0.83	4.24	10
Biomasa de ramas	$y = 0.171x + 16.106$	-0.11	4.57	10
Biomasa de fuste	$y = 2.966x + 24.724$	0.85	3.74	10

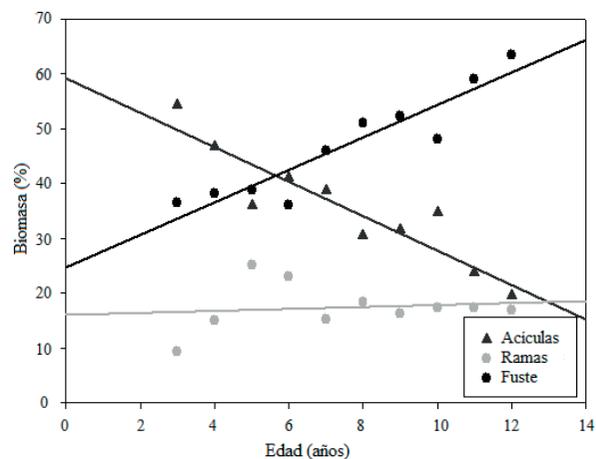


Figura 3. Porcentaje de biomasa por componente en la regeneración natural de *Pinus durangensis* en la región de El Salto, Durango

DISCUSIÓN

Aguilar (1991) realizó una comparación de cuatro modelos matemáticos (Weibull, Schumacher, Gompertz y logístico) aplicados al crecimiento edad-altura en tres calidades de estación en la especie de *P. douglasiana*. Los modelos Weibull, Schumacher y Gompertz presentan mejor ajuste que otros en diferentes etapas y el modelo de Gompertz presenta una mínima de falta de ajuste. A diferencia con García *et al.* (1992), donde obtuvieron un coeficiente de determinación de 0.940 y un error cuadrático medio de 0.359, con el modelo lineal para predecir el crecimiento en altura en especies de *S. macrophylla* en la plantación de “San Felipe-Bacalar” Quintana Roo.

García *et al.* (1992) determinaron el crecimiento en diámetro de una plantación de la especie de *Swietenia macrophylla* King (caoba) con el modelo lineal obteniendo un coeficiente de determinación de 0.98 y un error estándar de 0.43.

CONCLUSIONES

Los modelos de crecimiento ajustados a los componentes de *P. durangensis* indican que los mejores ajustes se registran al diámetro, seguido por altura, carbono total, carbono en acículas, carbono en ramas y finalmente al carbono en el fuste. Los resultados indican que los mejores ajustes se muestran al incluir todo el árbol completo (suma de todos los componentes) seguido por acículas, ramas y finalmente el fuste.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, R.M.** (1991). Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Revista de Ciencia Forestal*, 16(70), 87-107.
- Clutter, J., Fortson, J., Pienaar, G., Brister, G., & Bailey, R.** (1983). *Timber Management: a Quantitative Approach*. New York: John Wiley and Sons. 333 p.
- Cubillos, D.V.** (1987). Modelos de crecimiento diametral para algunos renovales de Raulí. *Ciencia e Investigación Forestal*, 1, 67-77.
- García, C.X., Lezama, P.C., & Santiago, R.B.** (1992). Modelos de crecimiento para una plantación de caoba (*Swietenia macrophylla* King). *Revista de Ciencia Forestal*, 17(71), 88-102.
- Gayoso, J., Guerra J., & Alarcon, D.** (2002). Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas: Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Valdivia: Universidad Austral de Chile. 157 p.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change].** (1994). The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press. 47 p.
- Morales, C.F., & Ruiz, G.V.J.** (2004). Estimación de peso verde, peso seco y volumen de fuste mediante la densidad aparente de la madera en *Pinus cooperi* y *Pinus leiophylla*. En la región de El salto, Durango (Tesis de pregrado). El Salto, Durango: Instituto Tecnológico Forestal El Salto. 92 p.
- Van Laar, A., & Akca, A.** (1997). *Forest Mensuración*. Göttingen: Cuvillier Verlag. 418 p.