

Distribución de biomasa en componentes de *Pinus patula* en reforestaciones en la Sierra Norte de Oaxaca, México

Biomass distribution in components of *Pinus patula* in reforestations in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico

Guadalupe Pacheco-Aquino ^a , Filemón Manzano-Méndez ^b , Joel Martínez-López ^{a*} 

* Autor de correspondencia: ^a Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, mjoel@unsij.edu.mx

^b Comisión Nacional Forestal, San Juan de Ocotán, Rinconada del Bosque, Zapopan, Jalisco, México.

^a Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, tel.: +52 951 5507220.

RESUMEN

Se generó y evaluó un sistema de ecuaciones alométricas para estimar biomasa total y por componentes en reforestaciones de *Pinus patula*, en la Sierra Norte de Oaxaca, México. Se realizó un muestreo dirigido de 18 árboles que representaron el potencial de crecimiento del sitio y mediante el método destructivo se obtuvo el peso fresco *in situ*, así como muestras de cada componente del árbol para estimar el peso seco. Se relacionó la biomasa total del árbol con su diámetro normal a partir del ajuste de ecuaciones alométricas a través de técnicas de regresión. La ecuación exponencial fue seleccionada para estimar la biomasa total por presentar los mejores indicadores estadísticos. El modelo exponencial fue ajustado nuevamente a cada componente mediante un sistema de ecuaciones simultáneas. Las ecuaciones alométricas obtenidas mostraron un buen rendimiento para estimar la biomasa aérea en componentes y árbol total en reforestaciones de *Pinus patula*, en diámetros y condiciones ambientales semejantes. La distribución de la biomasa aérea estimada en campo fue en promedio de 69,8 % para fuste, de 20,5 % para ramas y de 9,7 % para follaje.

Palabras clave: categorías diamétricas, ecuaciones alométricas, peso fresco, peso seco, regresión.

ABSTRACT

A system of allometric equations was generated and evaluated to estimate the total biomass and its components during the reforestation of *Pinus patula* in Sierra Norte of Oaxaca State, Mexico. For this purpose, 18 trees were directly sampled, which represented the growth potential of the site. Using this destructive method, the fresh weight *in situ*, and samples of each component of the tree were obtained to estimate the dry weight. The total tree biomass was related to its normal diameter by adjusting allometric equations using regression techniques. The exponential equation was selected to estimate the total biomass because it presented the best statistical indicators. The exponential model was again fitted to each component by using a system of simultaneous equations. The allometric equations obtained showed good performance in estimating aerial biomass in components and total tree biomass in the reforestation of *Pinus patula*, with similar diameters and environmental conditions. The distribution of aerial biomass estimated in the field was 69.8 % for stems, 20.5 % for branches, and 9.7 % for foliage.

Keywords: diameter categories, allometric equations, dry weight, wet weight, regression.

INTRODUCCIÓN

En el contexto del cambio climático, los bosques juegan un papel primordial debido a su capacidad de fijación de CO₂ a través del proceso de fotosíntesis. De esta manera, los árboles almacenan carbono en sus estructuras como fuste, ramas, follaje, frutos y sistema radicular (Flores-Nieves *et al.* 2011). Por esta razón, una estimación adecuada de la biomasa es importante para determinar el carbono aéreo de los árboles y así estimar el potencial que tiene la masa forestal para fijar CO₂ (Díaz-

Franco *et al.* 2007, Ranero y Covalada 2018). Adicionalmente, es posible estimar la cantidad de madera a aprovechar cuando esta se usa como biocombustible, ya sea en la industria o el hogar (González 2008, Chávez-Aguilar *et al.* 2016). Esta información es la base para desarrollar proyectos relacionados con la venta de bonos de carbono en el mercado voluntario, que representa un área de oportunidad de ingresos económicos para las comunidades y ejidos que cuentan con bosques y selvas (Ranero y Covalada 2018). Es el caso de las comunidades de la Sierra Norte de Oaxaca que han realizado manejo forestal desde

hace décadas y cuentan con áreas de reforestación; por lo que tienen alto potencial para recibir pago por captura de carbono. Las ecuaciones alométricas permiten relacionar variables de fácil medición con otras que son más difíciles de obtener en campo (Díaz-Franco *et al.* 2007, Flores-Nieves *et al.* 2011). Sin embargo, la mayoría de este tipo de ecuaciones han sido generadas principalmente para árboles de grandes dimensiones, principalmente en bosques manejados (Ordaz-Ruiz *et al.* 2020) y pocas veces para árboles en reforestaciones (Martínez *et al.* 2020). Los árboles jóvenes de reforestaciones tienen un rol diverso en el almacén de biomasa y el ciclo del carbono, debido a que la distribución de biomasa y carbono en sus diferentes componentes cambia con relación a su diámetro, por lo que es necesario realizar estudios para determinar estos cambios de la proporción de biomasa en estos individuos (Montes de Oca-Cano *et al.* 2009, Flores-Medina *et al.* 2018). Conocer la distribución de la biomasa aporta información sobre su papel que tienen los árboles en el ecosistema, con relación en el ciclo de nutrientes, productividad, intercambio de materia y energía y la capacidad de almacenar y fijar CO₂. A nivel de individuo, la distribución de biomasa en el fuste, brinda información sobre cuanta madera se puede aprovechar y sobre la capacidad de conducción de agua y nutrientes. La distribución de ramas y follaje indica la capacidad de realizar fotosíntesis y su contribución de materia orgánica al suelo forestal (Chavez-Aguilar *et al.* 2016). *Pinus patula* Schl. *et Cham.* es una de las principales especies de pino en la Sierra Norte de Oaxaca, debido a las características de su madera y a su rápido crecimiento. Existen estudios para la generación de ecuaciones alométricas de esta especie en otras partes de México, pero estos incluyen árboles con diámetros mayores (Díaz-Franco *et al.* 2007, Martínez-Domínguez *et al.* 2020). Por lo anterior, el objetivo de estudio es estimar la proporción de biomasa y ajustar y evaluar ecuaciones alométricas para estimar biomasa total y por componentes en árboles en reforestaciones de *Pinus patula*, en la Sierra Norte del Estado de Oaxaca.

MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se llevó a cabo en reforestaciones de 8, 10 y 12 años con superficies variables. Estas reforestaciones presentaron individuos con diámetros entre los 5 y 32 cm y alturas totales entre 5,5 y 20 m. El tratamiento silvícola aplicado en estas áreas fue selección grupal y las reforestaciones tenían un arreglo de 3 bolillo con un espaciamiento de 3 x 3 metros. Se ubicaron dentro del predio comunal Santiago Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca (figura 1), el cual tiene una superficie total de 1.680,61 ha y está ubicado en las coordenadas 17° 17' 33" N y 96° 26' 00" O, a una altitud promedio de 2.000 m s.n.m. La temperatura media anual es de 17,2 °C y precipitación media de 1.183 mm, con clima templado subhúmedo y el tipo

de vegetación que predomina es el bosque de pino-encino (INEGI 2018).

Procedimiento para la obtención de la muestra. Para generar las ecuaciones alométricas se realizó un muestreo dirigido (Vargas-Larreta *et al.* 2017), de los árboles que representaron el potencial de crecimiento del sitio, cuyas características fueron: fustes rectos, sin presencia de plagas y enfermedades y buena conformación de la copa. Se eligieron 18 árboles que correspondieron a tres individuos para seis categorías diamétricas (5, 10, 15, 20, 25 y 30 cm), algunos autores han usado tamaños de muestra semejantes, tanto en el número de árboles por categoría diamétrica como el número total de árboles (Díaz-Franco *et al.* 2007, Martínez-Domínguez *et al.* 2020), obteniendo un buen ajuste en las ecuaciones. Se utilizó el método destructivo usado en otros estudios (Carrillo *et al.* 2016, Flores-Medina *et al.* 2018), que consistió en el derribo de los árboles seleccionados y la medición y registro del diámetro a 1,3 m de altura (diámetro normal = DN) y posteriormente se separaron sus componentes: fuste, ramas y follaje. Cada componente se pesó *in situ* para obtener su peso fresco, con el apoyo de una báscula romana TECNOCOR 200-rm colgante con capacidad de 200 kg. Para ello, los fustes con corteza se seccionaron en longitudes de 1,5 m y las ramas con corteza en longitudes de 1,0 m aproximadamente, el follaje se pesó con la ayuda de una lona y al finalizar se descontó el peso de la lona. Se obtuvieron muestras de cada componente para obtener su biomasa mediante la relación peso fresco - peso seco y el número de muestras estuvo en función de las categorías diamétricas, cinco muestras por componente para árboles de 5, 10 y 15 cm, y 10 muestras para árboles de 20, 25 y 30 cm. Para el caso del fuste, las muestras fueron rodajas con un espesor de 5 cm, para las ramas y del follaje, se obtuvieron porciones representativas del total. Las muestras se introdujeron en bolsas de plástico, se etiquetaron y se llevaron al laboratorio químico-biológico de la Universidad de la Sierra Juárez y fueron pesadas en una balanza marca OHAUS Triple Beam con capacidad de 2.610 g. Las muestras de fuste se ingresaron a un horno de secado marca RIOSSA, manteniéndose a una temperatura constante de 80 °C, mientras que las muestras de ramas y follaje se depositaron en bolsas de papel y se ingresaron en un secador rústico a una temperatura constante de 35 °C y se realizaron mediciones del peso cada 24 horas hasta alcanzar el peso seco constante. Finalmente, se relacionaron los valores peso fresco - peso seco y se estimó el contenido de humedad (Walker 2010) (ecuación [1]):

$$CH(\%) = \frac{Pf - Ps}{Ps} \times 100 \quad [1]$$

Donde: *CH* es el contenido de humedad (%), *Pf* es peso fresco de la muestra (kg) y *Ps* es peso seco de la muestra (kg).

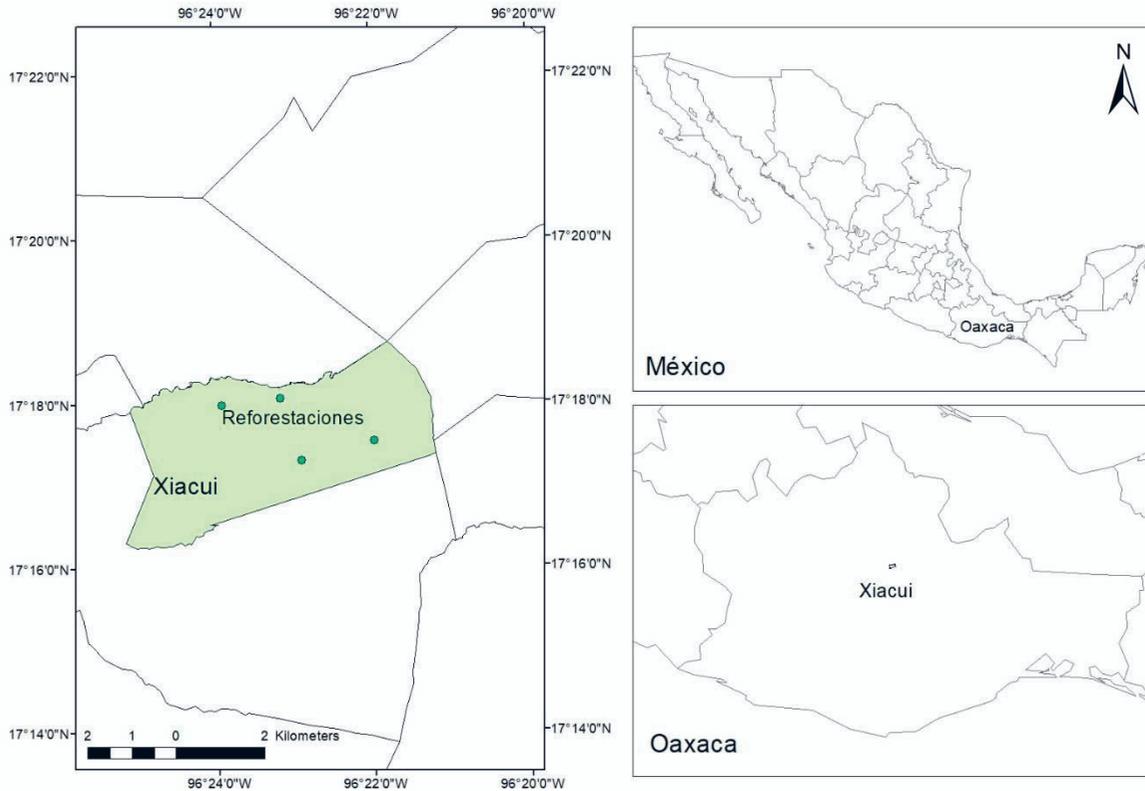


Figura 1. Ubicación de las áreas de reforestación en el predio comunal de Santiago Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca. Elaboración propia con base en el <http://geoportalconabio.gob.mx/>

Location of the reforestation areas in the communal property of Santiago Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca. Own elaboration based on <http://geoportalconabio.gob.mx/>

La estimación de la biomasa por componente (Flores-Nieves *et al.* 2011), fue calculada con:

$$B = PF \frac{PF - CH}{100} \quad [2]$$

Donde: *B* es biomasa (kg), *PF* es peso fresco (kg) del componente arbóreo y *CH* es el contenido de humedad (%).

Ajuste por regresión. Se sumaron los valores de cada componente para obtener la biomasa total del árbol y se ajustaron las ecuaciones [3], [4], [5] y [6] a la biomasa total en función del diámetro normal, debido a que esta variable es de las más utilizadas en inventarios por su fácil medición (Carrillo *et al.* 2016).

Ecuación exponencial: $Y = \beta_0 e^{\beta_1 X}$ [3]

Ecuación polinomial: $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$ [4]

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X^2 \quad [5]$$

Ecuación potencial: $Y = \beta_0 X^{\beta_1}$ [6]

Donde: *Y* es la biomasa total en kg, *X* es el diámetro normal en cm y *b_i* son los parámetros a estimar.

Estas ecuaciones fueron procesadas con el paquete “*nls*” del programa R usado para modelos de regresión no lineal y se seleccionó el mejor modelo considerando el mayor valor de *R*², el menor valor de la raíz del cuadrado medio del error (RCME), la significancia de los estimadores y el error estándar de los parámetros (Rojo-Martínez *et al.* 2005). A partir del mejor modelo obtenido para estimar la biomasa, se formularon los modelos por componente y se ajustaron como un sistema de ecuaciones simultáneas (González *et al.* 2007), para asegurar que la estimación de la biomasa total fuera igual que la suma de la biomasa de cada componente. Para el ajuste simultáneo de ecuaciones se utilizó la función “*nlsystemfit*” del paquete “*systemfit*” empleando el software R 3.6.1 (R Core Team 2022).

RESULTADOS

Se obtuvieron los indicadores estadísticos para evaluar el desempeño de las ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea total en árboles de *P. patula* (cuadro 1).

En general, los modelos presentaron errores estándar bajos, valores de RECM similares y R² ajustados por arriba de 0,90, por lo que se observó que tienen buena bondad de ajuste. Sin embargo, el modelo polinomial presentó errores estándar altos y dos de sus parámetros resultaron no significativos para un valor $P < 0,05$. Por otra parte, el tercer modelo tuvo errores estándar menores al modelo polinomial pero el estimador del intercepto no fue significativo. Esto fue similar para el modelo potencial, que presentó errores estándar más bajos que el tercer modelo, pero el mismo parámetro no fue significativo. Por lo

anterior, se eligió el modelo exponencial, debido a que presentó errores estándar bajos, un valor de R ajustado mayor a 0,90 y ambos parámetros de este modelo resultaron significativos.

Las ecuaciones alométricas ajustadas de forma simultánea para la estimación de biomasa de componentes (fuste, ramas y follaje) presentaron una buena bondad de ajuste. También se obtuvieron los indicadores estadísticos de las ecuaciones de aditividad para estimar la biomasa de los componentes de *Pinus patula* en reforestaciones (cuadro 2).

Cuadro 1. Indicadores estadísticos de las ecuaciones alométricas ajustadas para estimar biomasa área total.

Statistical indicators of the allometric equations adjusted to estimate total area biomass.

Modelo	Parámetros	Valor	Error estándar	Valor de t	Prob > F	RCME	R ² adj
$Y = B_0 e^{\beta_1 X}$	β_0	10,94810	3,06440	3,572	0,00255	25,651	0,93
	β_1	0,10778	0,00990	10,884	< 0,0001		
$Y = B_0 + B_1 X + B_2 X^2$	β_0	17,09600	25,0258	0,683	0,5049	20,326	0,95
	β_1	-4,58624	3,2509	-1,411	0,1787		
	β_2	0,44252	0,0894	4,951	0,0002		
$Y = B_0 + B_1 X^2$	β_0	-16,3629	8,23139	-1,988	0,0642	20,615	0,95
	β_1	0,3188	0,01781	17,899	< 0,0001		
$Y = B_0 + X^{\beta_1}$	β_0	0,06398	0,0448	1,43	0,172	20,615	0,95
$Y = B_0 + X^{\beta_1}$	β_1	2,46241	0,2110	11,67	< 0,0001		

R² adj = coeficiente de determinación ajustado, RCME = raíz del cuadrado medio del error.

Cuadro 2. Indicadores estadísticos de bondad de ajuste de las ecuaciones de aditividad para estimar la biomasa (kg) de los componentes y árbol total de *Pinus patula* en reforestaciones

Statistical indicators of goodness of fit of the additivity equations to estimate the biomass (kg) of the components and total tree of *Pinus patula* in reforestations

Componente	Parámetros	Valor	Error estándar	Valor de t	Prob > F	RCME	R ² adj
Fuste	β_0	7,0712270	2,559993	2,76	0,0138	623,89	0,90
	β_1	0,1126693	0,012724	8,85	< 0,0001		
Ramas	β_0	2,5436856	0,979831	2,59	0,0194	93,59	0,76
	β_1	0,1078076	0,013629	7,90	< 0,0001		
Follaje	β_0	1,0270342	0,659811	1,55	0,1391	34,55	0,08
	β_1	0,1078073	0,022731	4,74	0,0002		
	β_1	7,3715459	1,482550	4,97	0,0001		
Árbol total	β_2	0,1078077	0,007116	15,14	< 0,0001	789,55	0,92
	β_3	2,5436856	0,979831	2,59	0,0202		
	β_4	0,1078076	0,013629	7,90	< 0,0001		
	β_5	1,0270342	0,659811	1,55	0,1404		
	β_6	0,1078073	0,022731	4,74	0,0002		

Prob > F = significancia en la prueba de F, RCME = raíz del cuadrado medio del error, R² adj = coeficiente de determinación ajustado.

Se encontró que todas las ecuaciones ajustadas presentaron errores estándar bajos y la ecuación para estimar la biomasa del árbol total presentó el valor más alto de R^2 (0,92), seguida de la ecuación de fuste (0,90), de ramas (0,76) y, por último, la ecuación de follaje (0,08). Las ecuaciones alométricas para fuste y árbol total mostraron los coeficientes de determinación más altos; por lo que se comprobó que las ecuaciones alométricas generadas son confiables para estimar la biomasa aérea en componentes y para el árbol total con base en el diámetro normal en reforestaciones de *Pinus patula*, para diámetros similares y bajo condiciones ambientales semejantes en la misma región de estudio. Las curvas de regresión ajustadas a los datos generados manifestaron una tendencia ascendente en

la producción de biomasa aérea por componentes y para el árbol total con el aumento del diámetro normal (figura 2).

La biomasa aérea total del árbol presentó un comportamiento proporcional al incremento del diámetro normal y su distribución porcentual por componente fue de 61,1 % a 74,7 % en el fuste, 19,3 % a 21,9 % en las ramas, y de 6,0 % a 17,0 % para el follaje. Se observó que la distribución de la biomasa en el fuste se incrementó con el cambio ascendente en todas las categorías diamétricas. Por el contrario, la distribución en ramas y follaje disminuyó conforme aumentó la categoría diamétrica. Finalmente, la distribución promedio no ponderada de la biomasa aérea fue de 69,8 %, 20,5 % y 9,7 %, para fuste, ramas y follaje, respectivamente (cuadro 3).

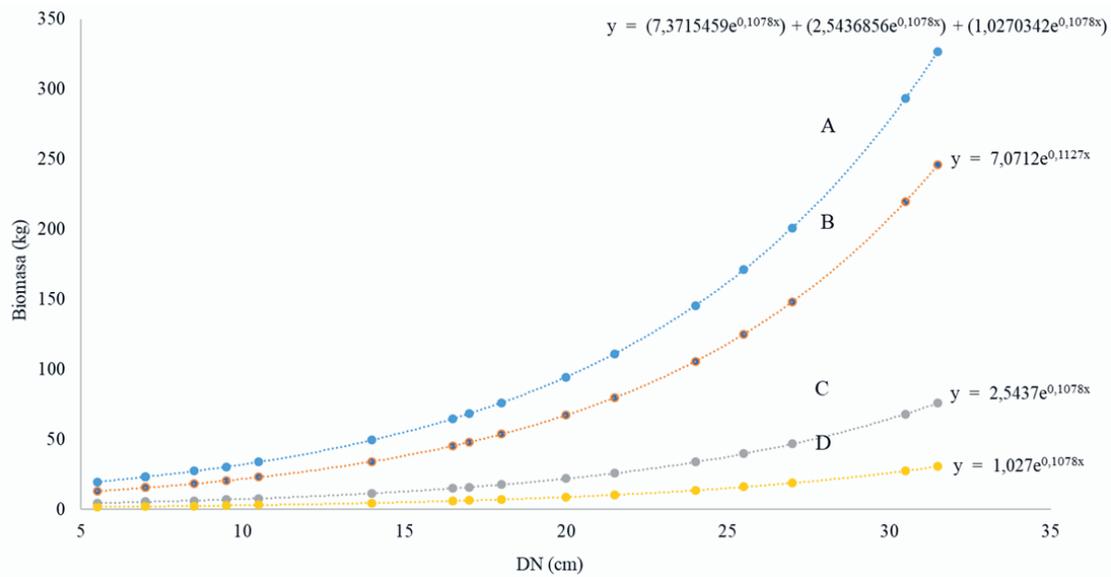


Figura 2. Curvas de regresión ajustadas con el modelo exponencial para la estimación de biomasa aérea en árbol total (A) y por componentes: fuste (B), ramas (C) y follaje (D), en árboles de *Pinus patula* en reforestaciones.

Regression curves adjusted with the exponential model for the estimation of aerial biomass in total tree (A) and by components: stem (B), branches (C) and foliage (D), in *Pinus patula* trees in reforestations.

Cuadro 3. Distribución de biomasa aérea total del árbol por categoría diamétrica (CD) en reforestaciones de *Pinus patula*.

Distribution of total aerial biomass of the tree by diameter category (DC) in reforestations of *Pinus patula*.

CD	n	Biomasa (en kg)				Total Predicho	Distribución (%)		
		Fuste	Ramas	Follaje	Suma Total		Fuste	Ramas	Follaje
5	3	2,6	0,9	0,7	4,2	3,98	61,1	21,9	17,0
10	3	13,9	4,4	2,4	20,7	20,49	67,2	21,2	11,6
15	3	37,6	11,0	4,9	53,6	53,43	70,2	20,6	9,2
20	3	76,1	21,2	8,1	105,4	105,44	72,2	20,1	7,7
25	3	131,4	35,1	12,0	178,5	178,66	73,6	19,7	6,7
30	3	205,3	53,1	16,6	274,9	274,89	74,7	19,3	6,0
Promedio		77,8	20,9	7,5	106,2	106,15	69,8	20,5	9,7

DISCUSIÓN

La ecuación exponencial presenta mejor rendimiento predictivo, misma que se reporta en trabajos similares (Díaz-Ríos *et al.* 2016, Rodríguez-Larramendi *et al.* 2016), lo que muestra que al usar variables de fácil medición, como el diámetro normal, es posible estimar la biomasa total y sus componentes. Estas ecuaciones son confiables para estimar la biomasa de árboles de *Pinus patula*, en reforestaciones con condiciones ambientales semejantes y con diámetros dentro del rango del estudio; con esta información se pueden obtener valores de referencia que son útiles para estimar la acumulación promedio por unidad de superficie y usarse para extrapolar la información a mayores superficies (Nájera y Hernández 2009), limitándose a bosques de la Sierra Norte de Oaxaca, en donde se encuentra el sitio de estudio.

En otros trabajos de investigación sobre biomasa total, la ecuación potencial es la que mejor bondad de ajuste tiene de acuerdo con la naturaleza de los datos, como lo reportan Díaz-Franco *et al.* (2007), quienes trabajaron con *Pinus patula* y Carrillo *et al.* (2016), quienes analizaron datos obtenidos de *Pinus hartwegii* Lindl.

De acuerdo con los indicadores estadísticos de las ecuaciones de aditividad para estimar la biomasa de los componentes y árbol total de *Pinus patula*, las ecuaciones muestran buena bondad de ajuste para biomasa total, de fuste y ramas. Sin embargo, para el caso de la biomasa en follaje, los valores indican que es conveniente ajustar otros modelos para este componente, como se realiza en otras investigaciones (Martínez-Domínguez *et al.* 2020).

La cantidad de biomasa total del árbol está directamente relacionada con la edad y, por tanto, con el diámetro normal (Chávez-Aguilar *et al.* 2016, Martínez *et al.* 2020), por ello, algunas prácticas silvícolas como los aclareos pueden estimular el crecimiento de los árboles e incrementar su biomasa (Chávez-Aguilar *et al.* 2016). De igual manera, el incremento en biomasa aérea depende de la calidad de sitio, pendiente, exposición, densidad del rodal, variación genética de la especie y cambios estacionales (Chávez-Pascual *et al.* 2017).

La mayor cantidad de biomasa en plantaciones jóvenes se localiza regularmente en el fuste (Pacheco *et al.* 2007), como se reporta en el presente estudio (69,8 %). Estudios previos en diferentes especies del género *Pinus* (Carrillo *et al.* 2016, Vargas-Larreta *et al.* 2017, Martínez-Domínguez *et al.* 2020), con valores entre 60 y 70 %. En contraste, otros trabajos sugieren valores más altos; por ejemplo, Miguel-Martínez *et al.* (2016) mencionan que en individuos de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., el 81 % de la biomasa está en el fuste. Por su parte, Flores-Nieves (2011) indica que en *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. el 97,0 % de la biomasa del árbol está en el fuste. Estas diferencias pueden deberse a que en estos últimos estudios se consideraron árboles de bosques naturales. Al respecto, Montes de Oca-Cano *et al.* (2009)

mencionan que la biomasa del fuste está correlacionada positivamente con el tamaño del árbol, la cual se incrementa en los árboles de mayores dimensiones, además, se ve poco afectada por fenómenos naturales eventuales. La mayor proporción de biomasa en el fuste puede explicarse también por las características genéticas del material vegetal, así como por los tratamientos silviculturales intermedios para manejar la densidad y el efecto de las podas (Chávez-Pascual *et al.* 2017).

El valor de la distribución proporcional en ramas (20,5 %) fue semejante a los resultados obtenidos por Carrillo *et al.* (2016), quienes estiman un 23,8 % de biomasa para este componente. En el caso del trabajo de Montes de Oca-Cano *et al.* (2009) en *Pinus durangensis* Martínez, se reporta que el 17,3 % de la biomasa se encuentra en las ramas. Asimismo, Miguel-Martínez *et al.* (2016), señalan que el 14 % de la biomasa se ubica en las ramas. Por otra parte, otros estudios reportan valores más bajos, como Martínez-Domínguez *et al.* (2020), quienes indican que el porcentaje de biomasa en ramas es de 5,67 % y Flores-Nieves *et al.* (2011) estiman valores de 3 % para este componente. Las proporciones estimadas para estos trabajos son menores en comparación con el resultado que se reporta en este estudio, debido a que estos usaron individuos de mayores dimensiones. Una menor proporción de biomasa de ramas en árboles jóvenes se relaciona con un mayor contenido de nutrientes, menor contenido de lignina y a la existencia de competencia entre individuos (Chávez-Aguilar *et al.* 2016).

La distribución de la biomasa en follaje (9,7 %) es semejante a la que reportan Carrillo *et al.* (2016), para *Pinus hartwegii*, con un valor de 10,9 %. De igual forma, López-López *et al.* (2006), mencionan que el porcentaje de distribución de biomasa en el follaje en árboles pequeños suele ser mayor que el porcentaje reportado para árboles de bosques naturales, lo cual se explica por qué los árboles pequeños tienen menor disponibilidad de recursos, dando prioridad a la producción de follaje y raíces, contrario a la producción de madera en el fuste. Además, cuando los árboles son jóvenes existe una menor competencia entre individuos y, en consecuencia, su crecimiento se ve favorecido (Pacheco *et al.* 2007). Asimismo, los árboles de menor diámetro por lo general tienen mayor copa en los primeros años, reduciéndose cuando la competencia se incrementa (González 2008). El valor de la distribución proporcional de la biomasa obtenida en follaje es bajo en comparación a lo reportado en otros estudios; como el realizado por Martínez *et al.* (2020), en brinzales de *P. hartwegii* quienes señalan que el 30 % de biomasa esta en este componente. Por su parte, Montes de Oca-Cano *et al.* (2009) reportan una biomasa de 35,64 % para el follaje en áreas con regeneración natural de *Pinus durangensis* Martínez. Asimismo, Pacheco *et al.* (2007), determinaron un 25 % de biomasa en este componente en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. Estas proporciones son altas comparadas con las obtenidas en el presente estudio y

están relacionadas con las diferencias de edad y el tamaño de los individuos muestreados (Pacheco *et al.* 2007). Los cambios en la distribución de biomasa en follaje se deben a que algunos sitios pueden presentar déficit hídrico durante la sequía, lo que ocasiona una disminución en la producción de biomasa en este componente. Esto se explica porque la biomasa del follaje es muy sensible a patrones climáticos y tratamientos silviculturales (Chávez-Aguilar *et al.* 2016, Chávez-Pascual *et al.* 2017). Además de que los incrementos de biomasa en follaje como en ramas tienen que ver con la composición y estructura de la copa y también están estrechamente correlacionados con el diámetro normal y la altura total (González 2008). A pesar de que la altura puede ser predictora de la biomasa en follaje, en este trabajo, solo se usó el diámetro normal, por la facilidad de la medición en campo durante los inventarios de biomasa y carbono. La disminución de la proporción de biomasa en ramas y follaje al aumentar el diámetro normal puede explicarse porque el follaje se genera en las ramas más jóvenes, lo que significa que la masa de follaje por unidad de masa de rama disminuye conforme crece el árbol (Mensah *et al.* 2016). Además, está influenciada por la posición que tiene en el dosel (Flores-Nieves *et al.* 2011). En general, las proporciones de biomasa en los componentes van cambiando conforme incrementa el diámetro, en donde el porcentaje de la biomasa en el fuste siempre tendrá una mayor proporción (Vargas-Larreta *et al.* 2017).

CONCLUSIONES

Las ecuaciones alométricas obtenidas mediante el modelo exponencial son útiles para estimar biomasa aérea en componentes y árbol total en individuos en reforestaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham. en bosques de la Sierra Norte de Oaxaca.

Bajo condiciones ambientales semejantes, estas ecuaciones pueden ser utilizadas en los inventarios forestales para la estimación de biomasa aérea en reforestaciones de esta especie con diámetros dentro del rango del estudio, constituyendo así una herramienta para la toma de decisiones dentro del contexto del manejo forestal.

El análisis de la distribución porcentual de biomasa aérea muestra que la mayor cantidad se encuentra almacenada en el fuste, seguida de las ramas y follaje. Además, conforme incrementa el diámetro normal, el porcentaje de biomasa del fuste aumenta, mientras que la biomasa en ramas y follaje decrece.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Guadalupe Pacheco Aquino, Filemón Manzano Méndez y Joel Martínez López diseñaron el estudio y recabaron los datos en campo. Todos los autores contribuyeron en el procesamiento, interpretación de los resultados, análisis de información y redacción del manuscrito.

FINANCIAMIENTO

Sin financiamiento.

AGRADECIMIENTOS

A los representantes comunales de Santiago Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca, por las facilidades y apoyo en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Carrillo AF, M Acosta, CR Jiménez, L González, JD Etchevers. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(3): 681-691. DOI: <https://doi.org/10.29312/re-mexca.v7i3.327>
- Chávez-Aguilar G, G Ángeles-Pérez, M Pérez-Suárez, MA López-López, E García-Moya, C Wayson. 2016. Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 22(3): 23-36. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231454>
- Chávez-Pascual EY, G Rodríguez-Ortiz, JR Enríquez-del Valle, VA Velasco-Velasco, M Gómez-Cárdenas. 2017. Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques* 23(3): 147-161. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>
- Díaz-Franco R, M Acosta-Mireles, F Carrillo-Anzueros, E Buendía-Rodríguez, E Flores-Ayala, JD Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y Carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Díaz-Ríos MDJ, A Vázquez-Alarcón, M Uribe-Gómez, A Sánchez, A Lara, A Cruz. 2016. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(SPE16), 3235-3249. Consultado 28 de agosto 2024. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263146726007.pdf>
- Flores-Nieves P, MA López-López, G Ángeles-Pérez, ML Isla-Serrano, G Calva-Vásquez. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(8):9-20. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i8.543>
- Flores-Medina F, DJ Vega-Nieva, JJ Corral-Rivas, JG Álvarez-González, AD Ruiz-González, CA López-Sánchez, A Carrillo. 2018. Desarrollo de ecuaciones alométricas de biomasa para la regeneración de cuatro especies en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(46): 157-185. Consultado 28 de agosto de 2024. Disponible en <https://scielo.org.mx/pdf/remcf/v9n46/2007-1132-remcf-9-46-157.pdf>
- González JGÁ, RR Soalleiro, AR Alboreca. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterogeneidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 23: 35-42.

- González ZM. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* spp. en el norte del Estado de Chiapas, México. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Cota Rica. 81 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2018. Base de datos geográficos. Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación (vectorial). Escala 1:250,000 (Serie VI). Consultado 5 de enero de 2022. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios/>
- López-López MÁ, A Velázquez-Martínez, J Acosta-Montoya, E Estañol-Botello. 2006. Biomass distribution in declining sacred-fir seedlings. *Interciencia* 31(6): 451-455. Consultado 5 de marzo de 2022. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000600013&lng=es&tlng=en.
- Martínez L, JEF Carrillo, M Acosta, ME Romero, R Pérez. 2020. Ecuaciones alométricas para estimar carbono en brinzales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60): 144-160. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.726>
- Martínez-Domínguez A, F Ruiz-Aquino, W Santiago-García, P Antúnez, MÁ López-López, C Valenzuela-Encinas, R Feria-Reyes. 2020. Allometric equations to estimate above-ground and belowground biomass of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Forest Science and Technology* 16(3): 161-170. DOI: <https://doi.org/10.1080/21580103.2020.1801526>
- Mensah S, R Kakaï, T. Seifert. 2016. Patterns of biomass allocation between foliage and woody structure: the effects of tree size and specific functional traits. *Annals of Forest Research* 59(1): 49-60. DOI: <https://doi.org/10.15287/afr.2016.458>
- Miguel-Martínez A, G Rodríguez-Ortiz, JR Enríquez-del Valle, MI Pérez-León, E Castañeda-Hidalgo, W Santiago-García. 2016. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(7): 1575-1584. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.151>
- Montes de Oca-Cano E, P García-Ramírez, JA Nájera-Luna, J Méndez-González. 2009. Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15 (1): 65-71. Consultado 25 de abril de 2022. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-40182009000100008&lng=es&nrm=iso
- Nájera LJA, E Hernández. 2009. Acumulación de biomasa aérea en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Ra-Ximhai* 5(2): 225-230. Consultado 10 de mayo de 2022. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46111507007>
- Ordaz-Ruiz G, J Hernández-Ramos, GG García-Espinoza, A Hernández-Ramos, P Delgado-Valerio, JJ García-Magaña. 2020. Relaciones alométricas para plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60): 97-119. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.705>
- Pacheco EFC, A Aldrete, A Gómez, AM Fierros, VM Cetina, H Vaquera. 2007. Almacenamiento de Carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3): 251-254. DOI: <https://doi.org/10.35196/rfm.2007.3.251>
- R core Team. 2022. RStudio: Publish your R and Python content with RStudio Connect. Boston, MA, USA. RStudio, Inc. <https://www.rstudio.com/>
- Ranero A, S Covalada. 2018. El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques* 24(SPE). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>
- Rodríguez-Larramendi LA, F Guevara-Hernández, L Reyes-Muro, J Ovando-Cruz, J Nahed-Toral, M Prado-López, RA Campos. 2016. Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37): 77-94. Consultado 28 de agosto 2024. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/634/63449187007.pdf>
- Rojo-Martínez GE, J Jasso-Mata, JJ Vargas-Hernández, DJ Palma-López, A Velázquez-Martínez. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39(4): 449-456. Consultado 20 de mayo de 2022. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/302/30239409.pdf>
- Vargas-Larreta B, CA López-Sánchez, JJ Corral-Rivas, JO López, CG Aguirre-Calderón, JG Álvarez-González. 2017. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forest of North-Western Mexico. *Forests* 8, 269. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8080269>
- Walker JCF. 2010. Primary wood processing: principles and practice. Springer Science & Business Media. Países Bajos. 596 p.

Recibido: 27/06/2023
Aceptado: 08/06/2024