

Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca*

Expansion factors aboveground biomass for *Pinus ayacahuite* of the north of Oaxaca

Anaberta Miguel-Martínez¹, Gerardo Rodríguez-Ortiz^{2§}, José Raymundo Enríquez-del Valle², María Isabel Pérez-León², Ernesto Castañeda-Hidalgo² y Wenceslao Santiago-García³

¹Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO). Ex hacienda de Nazareno, Oaxaca, C. P. 71230. Tel: 01(951)5170444. (migue_1_magui@hotmail.com). ²División de Estudios de Posgrado e Investigación-ITVO. (grodriguez.itvo@yahoo.com; jenriquezdelvalle@yahoo.com; leonisa70@hotmail.com; casta_h50@hotmail.com). ³Universidad de la Sierra Juárez, Ixtlán, Oaxaca. (forest_wsg@hotmail.com). [§]Autor para correspondencia: grodriguez.itvo@yahoo.com.

Resumen

La biomasa es un factor importante y difícil de determinar en especies forestales, los factores de expansión de biomasa (FEB) permiten su estimación utilizando variables de inventario para inferir la biomasa y carbono almacenado. El objetivo fue determinar FEB variables para biomasa aérea de *Pinus ayacahuite*, utilizando variables de fácil medición en rodales naturales de Ixtlán, Oaxaca. En 2013 se realizó muestreo destructivo de 30 árboles seleccionados de forma proporcional a la frecuencia relativa de la clase diamétrica. La biomasa se separó en follaje, ramas y madera+corteza; el volumen y biomasa fueron estimados mediante funciones alométricas. El modelo lineal de volumen obtuvo el mejor coeficiente de determinación (0.99). La biomasa por compartimentos se estimó con modelos no lineales, presentando pseudo-R² de 0.91, 0.91 y 0.97 para hojas, ramas y fuste+corteza, respectivamente; la biomasa total aérea se estimó con diámetro normal (DN) y altura total (AT) (psedo-R²=0.97). La partición de biomasa aérea se distribuye 5, 14 y 81% en hojas, ramas y fuste+corteza, respectivamente. El FEB presentó un valor promedio de 470.9 kg para un árbol con dimensiones promedio de DN= 17.9 cm y AT= 16.2 m.

Palabras clave: *Pinus ayacahuite*, función alométrica, muestreo destructivo, partición de biomasa.

Abstract

The biomass is an important and difficult determining factor in forest species, biomass expansion factors (FEB) allow their inventory estimation using variables to infer the biomass and carbon stocks. The objective was to determine FEB variables for aboveground biomass of *Pinus ayacahuite* using easily measured variables in natural stands of Ixtlan, Oaxaca. In 2013 destructive sampling was held of 30 trees selected in proportion to the relative frequency of diameter class. The biomass was separated into leaves, branches and wood+bark; the volume and biomass were estimated by allometric functions. The volume linear model had the best coefficient of determination (0.99). The compartmental biomass was estimated with nonlinear models, presenting pseudo-R² of 0.91, 0.91 and 0.97 for leaves, twigs and bole+bark, respectively; the total aboveground biomass was estimated normal diameter (DN) and total height (AT) (psedo-R²=0.97). The partition of aboveground biomass is distributed 5, 14 and 81% in leaves, branches and bole+bark, respectively. The FEB presented an average value of 470.9 kg for a tree with average dimensions of DN= 17.9 cm and AT= 16.2 m.

Keywords: *Pinus ayacahuite*, allometric function, biomass partition, destructive sampling.

Introducción

Actualmente existe una preocupación mundial por el calentamiento global y uno de los principales retos ambientales es la mitigación del cambio climático (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Salinas y Hernández, 2008). El calentamiento global ha sido resultado del aumento del efecto invernadero, principalmente el bióxido de carbono (CO₂) el cual se incrementa considerablemente por las actividades humanas (Acosta *et al.*, 2001); para ello, las Naciones Unidas han introducido el mecanismo REDD+ para reducir las emisiones de contaminantes (Manuri *et al.*, 2014).

A pesar de que los árboles en términos de fotosíntesis neta tienen una productividad menor que muchas plantas anuales, son considerados como sumidero de carbono a nivel global por la magnitud y longevidad de sus individuos y extensión que ocupan los ecosistemas forestales (Dixon *et al.*, 1994). Los bosques a nivel global, fijan y almacenan grandes cantidades de carbono durante su vida y pueden llegar a controlar hasta 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie terrestre (Apps *et al.*, 1993; Ordoñez *et al.*, 2011). Los árboles en particular, almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida, aun cuando también pudieran representar una fuente neta de emisión de CO₂ (Dixon *et al.*, 1994; Masera, 2002).

IEE (2006) y SEMARNAT (2001) reportan que el uso de suelo, el cambio en el uso de suelo y la silvicultura (USCUSS) en México, durante el período 1993 a 2002 presentaron 14% (89, 854 Gg CO₂ equivalente) de la emisión de CO₂, por lo tanto su rol como sumidero de carbono requiere de mayor investigación. La estimación de biomasa en los bosques es un tema relevante en relación con el problema del calentamiento global del planeta. En años recientes se han incrementado el interés por estudiar el papel de los bosques en los ciclos biogeoquímicos, especialmente del carbono, y su relación con los gases de efecto invernadero. Se parte del principio de que aproximadamente 50% de la biomasa estimada es carbono y por lo tanto, puede ser adicionada a la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂) cuando se corta y se quema (Morrissey y Justus, 1998).

La estimación de reservas de carbono en un ecosistema se puede determinar con la cantidad de biomasa arbórea aérea y subterránea, del suelo, mantillo, capa de fermentación, hierbas y arbustos. Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa aérea de un bosque. El método directo

Introduction

There is currently a worldwide concern about global warming and one of the main environmental challenges is climate change mitigation (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Salinas and Hernández, 2008). The global warming has been the result of increased greenhouse gases, mainly carbon dioxide (CO₂) which increases considerably by human activities (Acosta *et al.*, 2001); for this, the United Nations has introduced the REDD+ mechanism to reduce emissions of pollutants (Manuri *et al.*, 2014).

Although the trees in terms of net photosynthesis are less than many annuals productivity, are considered as a carbon sink globally by the magnitude and longevity of individuals and area occupied forest ecosystems (Dixon *et al.*, 1994). The forests globally, set and store large amounts of carbon during their lifetime and may control up to 90% of the annual flux of carbon between the atmosphere and the earth's surface (Apps *et al.*, 1993; Ordoñez *et al.*, 2011). Trees in particular store large amounts of carbon throughout their life, even though they could also represent a net source of CO₂ (Dixon *et al.*, 1994; Masera, 2002).

IEE (2006) and SEMARNAT (2001) report that land use, changes in land use and forestry (USCUSS) in Mexico during the period 1993 to 2002 showed 14% (89 854 Gg CO₂ equivalent) of CO₂ emissions, therefore their role as a carbon sink needs further investigation. The estimate of biomass in forests is an important issue in relation to the problem of global warming. In recent years they have increased interest in studying the role of forests in biogeochemical cycles, especially carbon, and its relationship to greenhouse gases. It is assumed that approximately 50% of the estimated biomass is carbon and therefore can be added to the atmosphere as carbon dioxide (CO₂) when cut and burned (Morrissey and Justus, 1998).

The estimate of carbon stocks in an ecosystem can be determined with the amount of air and ground tree biomass, soil, compost, fermentation layer, herbs and shrubs. There are direct and indirect to estimate the biomass of a forest methods. The direct method is to cut the tree and weigh biomass directly. Another way is to calculate the biomass indirectly through equations and mathematical models, obtained by regression analysis between the variables collected in field and forest inventories (Brown, 1997).

consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente. Otra forma es calcular la biomasa aérea de manera indirecta a través de ecuaciones y modelos matemáticos, obtenidos por análisis de regresión entre las variables colectadas en campo y en inventarios forestales (Brown, 1997).

Debido al alto costo y tiempo, se han empleado métodos simples, como es el caso de la aplicación de factores de expansión de biomasa (FEB), los cuales consisten en transformar el volumen fustal por árbol o por unidad de superficie en densidad de C por árbol o por la misma unidad de superficie por cada tipo de vegetación. Estos facilitan los cálculos de la densidad de C a partir de las existencias reales en un bosque. El objetivo de este estudio fue determinar modelos alométricos de volumen maderable, biomasa y FEB variables para los compartimentos aéreos de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw de rodales naturales bajo manejo en Ixtlán, Oaxaca.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en la parte noroeste del estado de Oaxaca, en la región Sierra Norte. *Pinus ayacahuite* se encuentra entre 96° 27' 31.278" latitud norte y 17° 24' 01.286" longitud oeste en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Su distribución comprende 1 137 ha en altitudes de 2 680 a 2 960 m y está asociado con *P. patula* Schl. et Cham, *P. pseudostrobus* Lindl y *Quercus* sp.

En 2013 se establecieron 12 sitios circulares de (400 m²) de manera aleatoria y dirigida a rodales con densidad de arbolado y métodos de aprovechamiento forestal diferentes en todo el área de estudio. En las unidades muestrales se realizó el inventario del arbolado para obtener la estructura diamétrica y de altura, lo cual sirvió para distribuir la muestra de árboles a derribar de manera proporcional a la frecuencia relativa.

Muestreo de biomasa

La obtención de biomasa de cada compartimento aéreo se efectuó siguiendo la metodología propuesta por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012). La muestra destructiva fue de 30 árboles, sin deformidades, representativos de la categorías de diámetro y altura; en cada árbol se midieron diversas variables de inventario (diámetro normal (DN),

Due to the high cost and time, they have been used simple methods, such as application of expansion factors biomass (FEB), which consist transform stem volume per tree or per unit surface density of C for tree or by the same unit area for each vegetation type. These facilitate the calculations of the density of C from the actual stock in a forest. The aim of this study was to determine allometric models of wood volume, biomass and FEB variables for air compartments *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw natural stands under management in Ixtlan, Oaxaca.

Materials and methods

Study area

The study area is located in the northwestern part of the state of Oaxaca, in the Sierra Norte region. *Pinus ayacahuite* is between 96° 27' 31.278" north latitude and 17° 24' 01.286" west longitude in the community of Ixtlan de Juárez, Oaxaca. Its distribution includes 1 137 ha in altitudes of 2 680-2 960 m and is associated with *P. patula* Schl. et Cham, *P. pseudostrobus* Lindl and *Quercus* sp.

In 2013 12 circular sites (400 m²) randomly established and directed a density stands of trees and different forestry methods throughout the study area. In the sample units woodland inventory was performed to obtain the diameter and height structure, which served to distribute the sample trees to break down in proportion to the relative frequency.

Biomass sample

The obtaining biomass of each air compartment it was carried out following the methodology proposed by Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012). The destructive sample consisted of 30 trees, without deformities, representative of the categories in diameter and height; in each tree several variables inventory were measured (normal diameter (DN), total height (AT), length of clear bole (LFL), length of live crown (LCV), crown diameter (DC) and diameter of stump (DT). The diameter was obtained with diameter tape (model 283D/20F, Jackson, MS, USA), lengths with longímetro[®] and height with electronic inclinometer (Haglöf EC II, Sweden). The trees were felled, sliced and separated by components (branches, foliage and wood with bark), using chainsaw (Husqvarna[®] 50 cm).

altura total (AT), longitud de fuste limpio (LFL), longitud de copa viva (LCV), diámetro de copa (DC) y diámetro de tocón (DT)). El diámetro fue obtenido con cinta diamétrica (modelo 283D/20F, Jackson, MS, USA), las longitudes con longímetro® y la altura con clinómetro electrónico (Haglöf EC II, Suecia). Los árboles fueron derribados, troceados y separados por componentes (ramas, follaje y madera con corteza), utilizando para ello motosierra (Husqvarna® de 50 cm).

Estimación de biomasa de ramas y hojas

Se tomaron nueve muestras por árbol (tres en cada sección de la copa), en las cuales se separaron hojas y ramas colocándolas en bolsas de papel debidamente identificadas con números progresivos de árbol y rama; se obtuvo peso verde (PV, en g) de ambos componentes con ayuda de una báscula modelo Dhaus CS con capacidad de 5 000 g.

Las muestras de hojas y ramas se secaron en una estufa modelo MemmertBeschichtung/Loading-Moll 100 -800 a una temperatura promedio de 75 °C hasta obtener su peso constante. Con la báscula modelo DHAUS CS con capacidad de 5 000 g se registró peso seco (PS, en gr) constante correspondiente de cada muestra de hojas y ramas. En total se obtuvieron 30 muestras de cada componente. La estimación de biomasa de ramas y hojas a nivel rama y árbol se obtuvo mediante ajustes de modelos de regresión no lineal usando el procedimiento Nlin Method=Dud del paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004).

Estimación de biomasa en madera con corteza

Después de separar ramas y hojas de los 30 árboles derribados, cada tallo se seccionó en trozas comerciales de 2.57 y 1.25 m de longitud dependiendo de la calidad de cada producto. Antes de medir cada troza comercial se obtuvieron tres rodajas de 10 cm promedio de espesor como muestra de cada árbol, las cuales fueron identificadas y pesadas al instante para obtener su peso verde (PV, g). En cada rodaja se midió con vernier marca Scala 222A® con aproximación de milímetro, espesor y diámetro en diferentes ejes (cm) para obtener volumen fresco (VV, cm³). Para obtener su peso seco constante (PS, g) se llevó a la estufa de secado a una temperatura promedio de 105 °C. Con estos datos se obtuvo la gravedad específica (GE= PS/VV, g cm⁻³), cuyo producto con el volumen de cada troza, generó la biomasa fustal de cada troza e individuo.

Estimating biomass of branches and leaves

The nine samples per tree were taken (three in each section of the cup), in which leaves and branches were separated by placing them in paper bags properly identified with progressive tree and branch numbers; was obtained green weight (PV, in g) of both components using a model Dhaus CS scale with capacity of 5 000 g.

The samples of leaves and branches dried in an oven model MemmertBeschichtung/Loading-Moll 100-800 at an average temperature of 75 °C until the constant weight. With DHAUS CS model scale with capacity of 5 000 g dry weight it was recorded (PS, in gr) corresponding constant of each sample of leaves and branches. In total 30 samples of each component they were obtained. The estimate of biomass of branches and leaves and tree branch level was obtained by adjusting nonlinear regression models using the Nlin Method= Dud procedure of SAS statistical package (SAS Institute Inc., 2004).

Estimation of biomass wood with bark

After removing branches and leaves of trees felled 30, each stem is sectioned into commercial logs of 2.57 and 1.25 m in length depending on the quality of each product. Before measuring each commercial troza three slices of 10 cm average thickness as a sample of each tree, which were identified and heavy instantly obtained for its green weight (PV, g). In each slice vernier measured with Scala mark to the nearest millimeter 222A®, thickness and diameter in different axes (cm) for fresh volume (VV, cm³). For their constant dry weight (PS, g) took to the drying oven at an average temperature of 105 °C. With these data the specific gravity (GE= PS/VV, g cm⁻³), whose product with the volume of each log was obtained, generated stem biomass of each log and individual.

Estimating biomass component tree wood+bark level was performed using nonlinear regression models, using the same procedure and statistical package using variables easy field measurement.

Getting volume tables and biomass expansion factor

To obtain the volume table with and without bark, were adjusted regression models that helped predict the different volumes of trees, depending on variables easy field measurement (normal diameter, DN) and overall height, AT).

La estimación de biomasa del componente madera+corteza a nivel árbol se realizó mediante modelos de regresión no lineal, usando el mismo procedimiento y paquete estadístico, empleando variables de fácil medición en campo.

Obtención de tablas de volumen y factor de expansión de biomasa

Para la obtención de la tabla de volumen con y sin corteza, se ajustaron con regresión modelos que ayudaron a predecir los diferentes volúmenes de los árboles, en función de las variables de fácil medición en campo (diámetro normal, DN) y altura total, AT).

Los modelos fueron ajustados mediante técnicas de regresión lineal mediante el procedimiento GML del paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004); evaluadas a través de sus valores estadísticos, coeficiente de determinación R^2 , suma de residuales, cuadrado medio del error (CME) y la dispersión de residuales. Los factores de expansión de biomasa se obtuvieron mediante el coeficiente de biomasa total aérea y volumen total árbol con corteza.

Resultados y discusión

Modelos de volumen con y sin corteza

El modelo del volumen con y sin corteza por árbol (VTcc y VTsc) para *Pinus ayacahuite* presentó un buen ajuste en sus parámetros de predicción, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99 en ambas variables, CME de 0.034 en VTcc y 0.035 en VTsc y coeficiente de variación de 13.7 y 15.9%, respectivamente. Ambos parámetros de la ecuación mostraron significancia de $p \leq 0.0001$. La relación existente entre ambos volúmenes y el diámetro de los árboles se puede describir mediante una función lineal cuadrática (Figura 1).

$$VT_{CC} = 0.0004670490(DN^2) + 0.0000088023(DN^2 \times AT)$$

$$VT_{SC} = 0.000376587(DN^2) + 0.0000092893(DN^2 \times AT)$$

Donde: $VT_{CC,SC}$ = volumen total con corteza y sin corteza (m^3), DN= diámetro normal (cm), AT= altura total (m).

Los coeficientes de ajuste y otros estadísticos de los modelos de volumen se mejoraron substancialmente al involucrar, además del DN, la AT generando ecuaciones

The models were fitted using linear regression techniques using the GML procedure of SAS statistical package (SAS Institute Inc., 2004); evaluated through their statistical values, coefficient of determination R^2 , amount of residual mean square error (CME) and dispersion of waste. The biomass expansion factors were obtained by the ratio of total aboveground biomass and total tree bark.

Results and discussion

Volume models with and without bark

The model volume with and without bark tree (VTcc and VTsc) for *Pinus ayacahuite* presented a good fit in their prediction parameters, with a coefficient of determination (R^2) of 0.99 in both variables, CME 0.034 in VTcc and 0.035 in VTsc and coefficient of variation of 13.7 and 15.9%, respectively. Both parameters of the equation showed significance of $p \leq 0.0001$. The relationship between volume and diameter of trees can be described by a quadratic linear function (Figure 1).

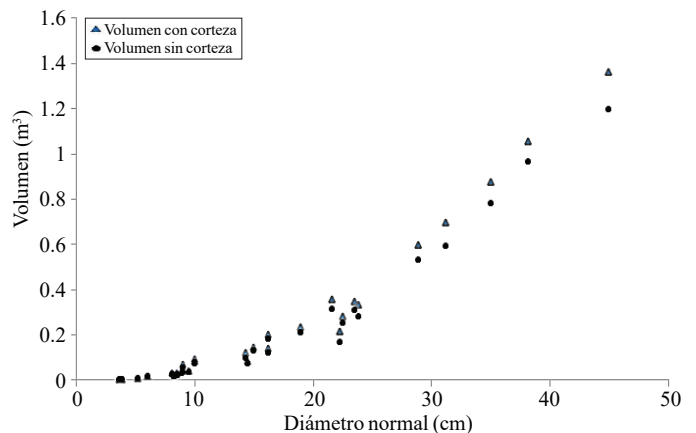


Figura 1. Relación entre diámetro normal y volumen con y sin corteza de *Pinus ayacahuite* de Ixtlán, Oaxaca.

Figure 1. Relationship between normal diameter and volume with and without bark of *Pinus ayacahuite* of Ixtlan, Oaxaca.

$$VT_{CC} = 0.0004670490(DN^2) + 0.0000088023(DN^2 \times AT)$$

$$VT_{SC} = 0.000376587(DN^2) + 0.0000092893(DN^2 \times AT)$$

Where: $VT_{CC,SC}$ = total volume with bark and bark (m^3), DN= normal diameter (cm), AT= total height (m).

altamente confiables ($R^2=0.99$). Al igual que *P. ayacahuite*, muchas especies del bosque mesófilo de montaña (Acosta *et al.*, 2011), *Pinus cooperi* Blanco (Arroyo y Paredes, 2006) y *P. chiapensis* (Chávez-Pascual *et al.*, 2013) han mostrado esta mejora en sus estimaciones.

Modelos para estimar biomasa por compartimento aéreo

El modelo de regresión que presentó un buen ajuste en sus diferentes parámetros de predicción de biomasa a nivel rama fue el modelo no lineal (1 y 2), con pseudo- $R^2=0.81$ en hojas y 0.74 en ramas mostrando significancia ($p<0.0001$) en ambos modelos (Cuadro 1).

La estimación de biomasa a nivel árbol de acuerdo a sus compartimentos, según los modelos de regresión presentó alto p - R^2 (0.91) en hojas y ramas y de 0.97 para biomasa en fuste y total aérea (Cuadro 2).

The fit coefficients and other statistical models volume is substantially improved by involving, in addition to the DN, the AT generating highly reliable equations ($R^2=0.99$). The like *P. ayacahuite*, many species of cloud forest (Acosta *et al.*, 2011), *Pinus cooperi* Blanco (Arroyo and Paredes, 2006) and *P. chiapensis* (Chávez-Pascual *et al.*, 2013) have shown this improvement in their estimates.

Models to estimate biomass by air compartment

The regression model showed a good fit in different prediction parameters biomass branch level was the nonlinear model (1 and 2), with pseudo- $R^2=0.81$ in leaves and 0.74 in branches showing significance ($p<0.0001$) in both models (Table 1).

The estimate tree biomass level according to their compartments, according to the regression models showed high p - R^2 (0.91) in leaves and branches and 0.97 for biomass and aboveground stem (Table 2).

Cuadro 1. Modelos no lineales para estimar biomasa a nivel rama en *Pinus ayacahuite* de Ixtlán, Oaxaca.
Table 1. Nonlinear models for estimating biomass in *Pinus ayacahuite* branch level of Ixtlan, Oaxaca.

| Modelo a nivel rama | Parámetro | Estimador | Error std | R^2 |
|--|-----------|-----------|-----------|-------|
| 1) $BH = \beta_0 \times (ABR \times DB)^{\beta_1}$ | β_0 | 0.0304 | 0.00479 | 0.81 |
| | β_1 | 0.4922 | 0.0429 | |
| 2) $BR = \beta_0 \times ABR^{\beta_1} \times AR^{\beta_2}$ | β_0 | 0.0589 | 0.0229 | 0.74 |
| | β_1 | 0.8804 | 0.097 | |
| | β_2 | 0.1262 | 0.1488 | |

BH= biomasa de hoja (kg); BR= biomasa en rama (kg); ABR= área basal de la rama ($\pi/4 \times DB^2$, cm^2); DB= diámetro de base de la rama (cm); A= altura de inserción de la rama en el tallo (m); $\beta_{0,1,2}$ = coeficientes de regresión.

Cuadro 2. Modelos no lineales para estimar biomasa de componentes aéreos a nivel árbol en *Pinus chiapensis* de Ixtlán, Oaxaca.

Table 2. Nonlinear models to estimate biomass components air a level tree *Pinus chiapensis* of Ixtlan, Oaxaca.

| Modelo a nivel árbol | Parámetro | Estimador | Error std | R^2 |
|---|-----------|-----------|-----------|-------|
| 3) $BH = \beta_0 \times DC^{\beta_1} \times AT^{\beta_2}$ | β_0 | 0.00588 | 0.00702 | 0.91 |
| | β_1 | 1.8375 | 0.279 | |
| | β_2 | 1.1302 | 0.4353 | |
| 4) $BR = \beta_0 \times AT^{\beta_1} \times DC^{\beta_2}$ | β_0 | 0.00119 | 0.0019 | 0.91 |
| | β_1 | 2.0024 | 0.5175 | |
| | β_2 | 1.8939 | 0.298 | |
| 5) $BF = \beta_0 \times (DN \times AT)^{\beta_1}$ | β_0 | 0.00566 | 0.00351 | 0.97 |
| | β_1 | 1.6274 | 0.0907 | |
| 6) $BT = \beta_0 \times (DN \times AT)^{\beta_1}$ | β_0 | 0.00817 | 0.0493 | 0.97 |
| | β_1 | 1.5928 | 0.0883 | |

BT= biomasa total aérea (kg); BH= biomasa en hojas (kg); BR= biomasa en ramas (kg) y BF= biomasa en tallo con corteza (kg). DC= diámetro de copa (m); AT= altura total (m); DN= diámetro normal (cm), $\beta_{0,1,2}$ = coeficientes de regresión.

El modelo de biomasa total que mejor se ajustó a los datos fue el que consideró el diámetro normal y la altura del árbol como variables independientes para este estudio. Estos concuerdan con Figueroa-Navarro *et al.* (2009), quienes indican que al utilizar ambas variables de inventario se mejoran los estimadores estadísticos de las ecuaciones.

Distribución de biomasa por compartimentos y factores de expansión de biomasa (FEB)

La distribución promedio de biomasa aérea por compartimento en *Pinus ayacahuite* para tallo fue de 81%, para ramas 14% y para hojas 5%. Los resultados muestran que a mayor diámetro mayor acumulación de biomasa en cualquiera de los compartimentos considerados; sin embargo, los árboles pequeños tienden a asignar una mayor cantidad a los compartimentos de hojas y ramas.

La cantidad de biomasa total aérea que se estimó para *Pinus ayacahuite* está en un rango entre 26.95 y 147.57 t ha⁻¹, que generan en el área de estudio (1 137 ha) entre 30 644.49 y 167 788.36 tB. La mayor proporción de biomasa está en el tallo (72.81 t ha⁻¹) y la menor en el follaje (3.3 t ha⁻¹) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estimación de volumen, biomasa por componente y total aéreo de *Pinus chiapensis* en Ixtlán, Oaxaca.
Table 3. Estimated volume, biomass component and total air of *Pinus chiapensis* in Ixtlan, Oaxaca.

| Variable | Biomasa (t ha ⁻¹) ^{&} | Biomasa (t) poblacional (1137 ha) |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Volumen con corteza (m ³) | 67.13 ≤ 190.28 ≤ 313.44 | 76320.85 ≤ 8654 ≤ 356379.21 |
| Biomasa en tallo | 21.22 ≤ 72.81 ≤ 124.4 | 24127.87 ≤ 3311.42 ≤ 141443.07 |
| Biomasa foliar | 0.80 ≤ 3.30 ≤ 5.8 | 912.76 ≤ 150.26 ≤ 6600.46 |
| Biomasa en ramas | 2.07 ≤ 11.20 ≤ 20.34 | 2347.82 ≤ 509.45 ≤ 23124.65 |
| Biomasa total | 26.95 ≤ 87.26 ≤ 147.57 | 30644.49 ≤ 3968.66 ≤ 167788.36 |

[&]Intervalos de confianza (95%) mediante la prueba t-Student, $t_{w/2(n-1)}$.

El estudio demuestra que en el fuste se encuentra la mayor parte (81%) de la biomasa aérea del árbol, varió de acuerdo al tamaño del árbol. Díaz-Franco *et al.* (2007) reportan valores similares (82% de biomasa en fuste) y Figueroa-Navarro *et al.* (2009), encontraron n rango de 36 a 85% para *Pinus patula* Schl. *et* Cham. Algunos valores de biomasa reportados en otras especies como es el caso de *Pinus pseudostrabus* Lindl. (plantaciones comerciales), se encuentran en un rango de 65.7 a 82%, dependiendo de la localidad y la edad del rodal (Méndez- González *et al.*, 2011).

Jiménez (2010) encontró un promedio de 65.31% de biomasa en fuste en *P. hartwegii* Lindl. y Pacheco (2011), reporta valores similares (63.25%). Sin embargo, esta distribución

The total biomass model that best fit the data was the considered the normal diameter and tree height as independent variables for this study. These match Figueroa-Navarro *et al.* (2009), who indicate that both variables using statistical estimators inventory equations are improved.

Compartmental distribution of biomass and biomass expansion factors (FEB)

The average distribution of biomass by *Pinus ayacahuite* compartment for stem was 81%, 14% to branches and leaves 5%. The results show that a greater diameter greater accumulation of biomass in any of the compartments in question; however, small trees tend to allocate more to the compartments of leaves and branches.

The amount of air that total biomass was estimated to *Pinus ayacahuite* is in a range between 26.95 and 147.57 t ha⁻¹, generated in the study area (1137 ha) between 30 644.49 and 167 788.36 tB. The largest proportion of biomass is on the stem (72.81 t ha⁻¹) and lowest in the foliage (3.3 t ha⁻¹) (Table 3).

The study shows that in the shaft is most (81%) of tree biomass, varied according to the size of the tree. Díaz-Franco *et al.* (2007) reported similar values (82% stem biomass) and Figueroa-Navarro *et al.* (2009), found n range from 36 to 85% for *Pinus patula* Schl. *et* Cham. Some biomass values reported in other species such as *Pinus pseudostrabus* Lindl. (Commercial plantations), are in a range of 65.7 to 82%, depending on the location and age of the stand (Méndez- González *et al.*, 2011).

Jimenez (2010) found an average of 65.31% stem biomass in *P. hartwegii* Lindl. and Pacheco (2011) reports similar values (63.25%). However, this distribution is low compared to other studies, for example; Avendaño *et al.* (2007) found

es baja en comparación con otros estudios, por ejemplo; Avendaño *et al.* (2007) encontraron que en *Abies religiosa* Kunt Schltld. *et* Cham., el promedio de biomasa en fuste es de 81.27%, al igual que González (2008) determinó 87.6% de biomasa de fuste para árboles de 6 a 67.2 cm de diámetro normal en *P. maximinoi* H. E. Moore, estos valores reportados son similares a *P. ayacahuite* bajo estudio.

La biomasa en hojas para *P. ayacahuite* (especie de interés) representó 5% de la biomasa total aérea, con un comportamiento constante respecto al diámetro del árbol (alrededor de la categoría diamétrica de 15 en adelante). Este valor es diferente al que reporta Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012) de 2.4% debido a que el estudio fue realizado en rodales jóvenes.

La biomasa foliar en árboles de edades menores reportan 18% en *Pinus patula* (Díaz-Franco *et al.*, 2007). En el Salto, Durango; Pachec *et al.* (2007), encontraron 25% de biomasa foliar en una plantación de *P. greggii* Engelm de 6 años de edad. González (2008) reporta una distribución de biomasa en ramas de 8.49% para *P. maximinoi* y de 11.20% para *P. oocarpa* Shiede, estos valores son cercanos o iguales para *P. ayacahuite* (especie bajo estudio). Otros estudios encontraron resultados altos, ejemplo Jiménez (2010) determinó 23.79% en *P. hartwegii* y Pacheco (2011) encontró 23.49% para *P. patula*.

Gayoso *et al.* (2002) mencionan que la distribución proporcional de la biomasa en los componentes arbóreos, está asociada a las características de los árboles según las especies, el estado de desarrollo y el grado de intervenciones silvícolas a que son expuestos los individuos.

La biomasa aérea de la especie de interés mostró un rango de 26.95 a 147.57 t ha⁻¹. Resultados similares 29.4 a 122.1 y promedio (39.36 57 t ha⁻¹) se reportaron para *P. pseudostrobus* Lindl. (Méndez-González *et al.*, 2011). A su vez, Gutiérrez y Lopera (2001) estimaron 87.2 y 446 tB ha⁻¹ en plantaciones comerciales de *P. patula* de 6 y 29 años, respectivamente. Al respecto Rodríguez-Laguna *et al.* (2007) encontraron una proporción de biomasa de 546.90 kg en árboles de diámetro normal de 5 a 42 cm para *P. pseudostrobus*.

Esta variación entre *P. ayacahuite*, *P. patula* y *P. pseudostrobus*, ocurre en virtud de que tales valores son de especies, edades, localización geográfica y metodologías diferentes a las empleadas para este estudio. Lo anterior, indica que en las plantaciones comerciales de rápido crecimiento el proceso

that religious *Abies religiosa* Kunt Schltld. *et* Cham, the average biomass of 81.27% shaft is, as González (2008) found 87.6% stem biomass 6 tree 67.2 cm diameter in *P. maximinoi* H. E. Moore, these reported values are Similar to *P. ayacahuite* under study.

The biomass sheets *P. ayacahuite* (species of interest) accounted for 5% of the total aboveground biomass with a constant behavior with respect to shaft diameter (about the diameter class 15 onwards). This value is different reporting Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012) of 2.4% because the study was conducted in young stands.

The foliar biomass in trees younger ages reported 18% in *Pinus patula* (Díaz-Franco *et al.*, 2007). In Salto, Durango; Pachec *et al.* (2007), found 25% of foliar biomass plantation *P. greggii* Engelm of 6 years old. González (2008) reports a distribution of biomass in branches of 8.49% for *P. maximinoi* and 11.20% for *P. oocarpa* Shiede, these values are close or equal to *P. ayacahuite* (species under study). Other studies found high results, such Jiménez (2010) found 23.79% in *P. hartwegii* and Pacheco (2011) found 23.49% for *P. patula*.

Gayoso *et al.* (2002) note that the proportional distribution of biomass in the tree components, is associated with the characteristics of trees by species, the state of development and degree of silvicultural to exposed individuals interventions.

Aboveground biomass of the species of interest showed a range of 26.95 to 147.57 t ha⁻¹. Similar results 29.4 to 122.1 and average (39.36 57 t ha⁻¹) were reported for *P. pseudostrobus* Lindl. (Méndez-González *et al.*, 2011). In turn, Gutiérrez and Lopera (2001) estimated 87.2 and 446 tB ha⁻¹ in commercial plantations of *P. patula* of 6 and 29 years respectively. About Rodríguez-Laguna *et al.* (2007) found a ratio of 546.90 kg biomass in trees normal diameter of 5 to 42 cm for *P. pseudostrobus*.

This variation between *P. ayacahuite*, *P. patula* and *P. pseudostrobus* occurs under such values are of species, age, geographical location and different methodologies to those used for this study. This indicates that in commercial plantations of fast growing process biomass accumulation is faster than in natural forests. The increase in biomass depends mainly on soil and climatic conditions including the rate of return and depending on the responsiveness presenting the trees will grow and therefore their biomass in relation to carbon sequestration (Acosta *et al.*, 2001).

de acumulación de biomasa, es más acelerado que en bosques naturales. El incremento de biomasa depende principalmente de las condiciones edafológicas y climáticas que incluyen en la tasa de rendimiento y dependiendo de la capacidad de respuesta que presentan los árboles, será su crecimiento y por lo tanto su biomasa en relación a la captura de carbono (Acosta *et al.*, 2001).

Con el modelo resultante del factor de expansión de biomasa (FEB) es posible conocer la biomasa total aérea acumulada de un árbol, conociendo está en función de la altura y el diámetro normal. En este estudio el FEB presentó un valor de 470.9 kg m⁻³ para un diámetro normal promedio de 17.92 cm y una altura de 16.2 m.

$$\text{FEB} = \frac{\text{BT}}{\text{VT}} = \frac{0.00817 \times \text{AT}^{1.5928} \times \text{DN}^{-0.4072}}{0.000467049 + 0.0000088023 (\text{DN} \times \text{AT})}$$

Donde: FEB= factor de expansión de biomasa (kg m⁻³); AT= altura total (m); DN= diámetro normal (cm).

El factor de expansión de biomasa (obtenido en el inventario), proporcionó una estimación de biomasa total aérea del árbol de 470.9 kg por árbol promedio en un (diámetro 17.92 cm y altura total 16.2 m) en la especie de interés. Estos valores concuerdan con Chávez-Pascual *et al.* (2013) que determinaron 444.14 kg/árbol promedio con dimensiones de diámetro normal de 27.7 cm y altura total de 23.3 m en *P. chiapensis* (Martínez) Andresen. Por otro lado, Silva-Arredondo y Návar-Cháidez (2010) obtuvieron de 0.55 a 0.98 t por árbol en *Pinus* sp.

Conclusiones

El factor de expansión de biomasa para *Pinus ayacahuite* corresponde a 470.9 kg m⁻³ para un árbol con diámetro normal promedio de 17.92 cm y una altura de 16.2 m. Por lo consiguiente, los modelos obtenidos para predecir biomasa a nivel rama y árbol en esta especie pueden ser utilizados en los inventarios para la estimación de biomasa aérea en rodales naturales, conociendo diámetro normal (DN), altura total (AT) y diámetro de copa (DC).

Pinus ayacahuite presenta una partición de biomasa aérea de 81, 14 y 5% en tallo+corteza, ramas y hojas, de tal manera que en árboles maduros la concentración de biomasa es mucho mayor en el tallo, teniendo el mayor potencial para almacenar biomasa y, por ende, carbono en todos sus compartimentos.

With the resulting model biomass expansion factor (FEB) it is possible to know the total biomass accumulated air from a tree, knowing is a function of the height and normal diameter. In this study the FEB presented a value of 470.9 kg m⁻³ for an average normal diameter of 17.92 cm and a height of 16.2 m.

$$\text{FEB} = \frac{\text{BT}}{\text{VT}} = \frac{0.00817 \times \text{AT}^{1.5928} \times \text{DN}^{-0.4072}}{0.000467049 + 0.0000088023 (\text{DN} \times \text{AT})}$$

Where: FEB= biomass expansion factor (kg m⁻³); AT= total height (m); DN = normal diameter (cm).

The biomass expansion factor (obtained in inventory), provided an estimate biomass aerial total of 470.9 kg per tree average tree in (17.92 cm diameter and total height 16.2 m) in the species of interest. These values agree with Chávez-Pascual *et al.* (2013) that determined 444.14 kg/tree average size of 27.7 cm average diameter and total height of 23.3 m in *P. chiapensis* (Martínez) Andresen. On the other hand, Silva-Arredondo and Návar-Cháidez (2010) obtained from 0.55 to 0.98 t per tree in *Pinus* sp.

Conclusions

The biomass expansion factor for *Pinus ayacahuite* corresponds to 470.9 kg m⁻³ for an average tree with normal diameter of 17.92 cm and a height of 16.2 m. So therefore the obtained models for predicting biomass branch level and tree species can be used in inventories for the estimation of aboveground biomass in natural stands, knowing normal diameter (DN), total height (AT) and crown diameter (DC).

Pinus ayacahuite has a partition aboveground biomass of 81, 14 and 5% in stem+bark, branches and leaves, so that in mature trees biomass concentration is much higher in the stem, having the greatest potential to store biomass and therefore carbon in its compartments.

End of the English version



Literatura citada

Acosta, M. M.; Carrillo, A. F. y Gómez, V. R. G. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies del bosque mesófilo de montaña. *Re. Mex. Cienc. Agric.* 2(4):529-543.

- Acosta, M. M.; Quednow, K.; Etchevers, J. y Monreal, C. 2001. Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. Colegio de Postgraduados. México. 1-11 pp.
- Acosta-Mireles, M.; Vargas-Hernández, J.; Velázquez-Martínez, A. y Etchevers-Barra, J. D. 2002. Estimación de biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 60:725-736.
- Apps, M. J.; Kurz, W. A.; Luxmoore, R. J.; Nilsson, L. O.; Sedjo, R. A.; Schmidt, R.; Simpson, L. G. and Vinson, T. S. 1993. Boreal forest and tundra. In: Wisniewski, J. and Sampson, R. N. (Eds.) *Terrestrial biosphere carbon fluxes: quantification and sources of CO₂*. Kluwer Academic Pub. 39-53 p.
- Arroyo, T. J. y Paredes, J. E. G. 2006. Estimación de la biomasa total y por componentes de hojas, ramas, copa y fuste en *Pinus cooperi* de la región de El Salto, Durango, México. Instituto Tecnológico del Salto, Durango, México. 37 p.
- Avendaño, H. D.; Acosta, M. M.; Carrillo, A. F. y Etchevers, B. J. D. 2007. Estimación de la biomasa y carbono en árboles de *Abies religiosa* (H. B. K) Schl. et Cham., mediante ecuaciones alométricas. In: Memoria del VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales, 28 al 31 de octubre. Morelia Michoacán, México. 1-9 pp.
- Brown, S. 1997. Bosques y cambio climático y la función de los bosques como sumideros de carbono. Antalya, Turquía. 2 p.
- Chávez-Pascual, E. Y.; Rodríguez-Ortiz, G.; Carrillo-Rodríguez, J. C.; Enríquez-del Valle, J. R.; Chávez-Servia, J. L. y Campos-Ángeles, G. V. 2013. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6:1273-1284.
- Díaz-Franco, R.; Acosta-Mireles, M.; Castillo-Anzures, F.; Buendía-Rodríguez, E.; Flores-Ayala, E. y Etchevers-Barra, J. D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Madera y Bosques*. 13(1):25-34.
- Dixon, R. K.; Brown, S.; Houghton, R. A.; Solomon, A. M.; Trexler, M. C. and Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 263:185-190.
- Figueroa-Navarro, C. M.; Ángeles-Pérez, G.; Velázquez-Martínez, A. y De los Santos-Posadas, H. M. 2009. Estimación de la biomasa en bosque bajo manejo de *Pinus patula* Scht all. et Cham. en Zacualtupán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. Fores.* 1(1):105-112.
- Gayoso, J.; Alarcón, D. y Trincado, G. 2002. Biomasa total de los ecosistemas forestales y acumulación de carbono". Programa Bosques Pro-Carbono de la Universidad Austral de Chile (Sociedad Inversora Forestal). Valdivia Chile. 38 p.
- González, Z. M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore. *Pinus ocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* spp. en el norte del estado de Chiapas, México. Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE-Costa Rica. 81 p.
- Gutiérrez, V. V. H. y Lopera, A. G. J. 2001. Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. In: *Symposium Internacional de medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales*. Universidad Nacional de Colombia. Valdivia-Chile. Resumen N° 10. 1-18 pp.
- IEE. 2006. Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. (1990-2002). 554 p.
- Jiménez, C. C. 2010. Usos de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en la parte aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 55 p.
- Manuri, S.; Brack, C.; Nugroho, N. P.; Hergoualé H. K.; Novita, N.; Dotzauer, H.; Verchot, L.; Septiadi, P. C. A. and Winyasari, E. 2014. Tree biomass equations for tropical peat swamp forest ecosystems in Indonesia. *Forest Ecol. Management*. 334: 241-253.
- Masera, O. 2002. Bosques y cambio climático en América Latina. Análisis y perspectiva. In: *la transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe*. Le, E.; Ezcurra, I.; Pisanty, E. y Romero, L. P. (Eds). SEMARNAT- Instituto de Ecología- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Organización de las Naciones Unidas. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 211-235 pp.
- Méndez-González, J. M.; Luckie-Navarrete, S. L.; Capó-Arteaga, M. A. y Nájera-Luna, J. A. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*. 45:479-491.
- Morrissey, A. y Justus, J. 1998. Global climate change. Committee for The National Institute for the Environment, Washington D.C. 32 p.
- Ordoñez, J. A. 2011. Captura de carbono en bosque templado: en el caso de San Juan Nuevo, Michoacán, México. *Agrociencia*. 31:73-81.
- Pacheco, A. G. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea por compartimentos en reforestaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham., en Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca. Universidad de la Sierra Juárez. Oaxaca, México. 58 p.
- Pacheco, E. F. C.; Alderete, A.; Gómez G. A.; Fierros, G., A. M.; Cetina, A. V. M. y Vaquera, H. H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Rev. Fitotec. Mex.* 30 (3): 251-254.
- Rodríguez-Laguna, R.; Jiménez-Pérez, J.; Aguirre-Calderón, O. y Jurado-Ibarra, E. 2007. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Rev. Cien. Forest.* 32(101):39-56.
- Rodríguez-Ortiz, G.; de los Santos-Posadas, H. M.; González-Hernández, V.; Aldrete, A. V. A.; Gómez-Guerrero, A. y Fierros-González, A. M. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Revista Madera y Bosques*. 18(1):25-41.
- Salinas, Z. y Hernández, P. 2008. Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de biotecnología. CATIE, Turrialba, C.R. 171 p.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT 9.1 User's guide. SAS Institute, Cary, N.C. USA. 4979 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2001. Estadística de deforestación en México: 1993-2000. México, D.F. 236 p.
- Silva-Arredondo, F. M. y Nívar-Cháidez, J. J. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 1(1):55-62.