

## Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen\*

### Aboveground biomass expansion factors for *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen

Edwin Yoshimar Chávez-Pascual<sup>1</sup>, Gerardo Rodríguez-Ortiz<sup>1</sup>, José Cruz Carrillo-Rodríguez<sup>1</sup>, José Raymundo Enríquez-del Valle<sup>1</sup>, José Luis Chávez-Servia<sup>2</sup> y Gisela Virginia Campos-Ángeles<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. C. P. 71230. Tel. 01(951) 5 17 07 88. (edwin-yoshimar@hotmail.com, jcarrillo\_rodriguez@hotmail.com, jenriquezdelvalle@yahoo.com, giscampos@gmail.com). <sup>2</sup>Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Unidad Oaxaca, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. C. P. 71230. Tel. 01(951)51706 10 y. 01951 5287680. (jchavezservia1@yahoo.com). <sup>3</sup>Autor para correspondencia: geraro65@gmail.com, grodriguez@colpos.mx.

## Resumen

Los factores de expansión de biomasa (FEB) permiten estimar la cantidad de biomasa fijada por árbol con base en variables de inventario; información útil para proyectos sobre cambio climático. El objetivo fue estimar FEB variables por árbol a través de la generación de modelos de regresión para volumen y biomasa aérea en *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen, en una comunidad de la Sierra Norte de Oaxaca. Se empleó muestreo destructivo de 70 árboles realizado durante 2012, seleccionando aleatoriamente individuos de forma proporcional a la frecuencia diamétrica. El tallo se cubió por el método de trozas traslapadas. El volumen de madera con corteza se transformó a biomasa mediante la gravedad específica y para el resto del componente aéreo se usaron factores de conversión de biomasa (peso seco/peso verde). Se obtuvieron modelos no lineales de volumen total y comercial con y sin corteza y de biomasa total aérea. Se emplearon variables alométricas de inventario como diámetro normal (DN, cm) y altura total (AT, m). Para la elaboración de tarifas volumétricas, los modelos ajustados mostraron coeficientes de determinación entre 0.94 y 0.98. El modelo de Schumacher-Hall mostró el mejor ajuste para biomasa total aérea con  $R^2=0.95$ , utilizando las mismas variables independientes que en el volumen. El FEB se

## Abstract

The biomass expansion factors (BEF) allow estimating the amount of biomass set per tree based on inventory variables; useful information for climate change projects. The objective was to estimate BEF variables per tree, through the generation of regression models for volume and aboveground biomass in *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen, in a community in the northern highlands of Oaxaca. Destructive sampling of 70 trees was made during 2012, randomly selecting individuals in proportion to the diametric frequency. The stem was cubed by the overlapping bolt method. The volume of wood with bark was transformed to biomass by the specific gravity and for the rest of the aboveground component were used conversion factors of biomass (dry weight / fresh weight). Nonlinear models of total volume and trade volume with and without bark and total aboveground biomass were obtained. Allometric variables were used from inventory like normal diameter (ND, cm) and total height (TH, m). For the elaboration of volumetric rates, adjusted models showed determination coefficients between 0.94 and 0.98. The Schumacher-Hall model showed the best fit for total aboveground biomass  $R^2=0.95$ , using the same independent variables from volume. The BEF was obtained

\* Recibido: febrero de 2013  
Aceptado: mayo de 2013

obtuvo mediante el cociente de los modelos de biomasa y de volumen total árbol con corteza ( $FEB_{vcc} = 1040.771 \times DN^{0.15073} \times AT^{0.42946}$ ). Con ésta ecuación, es posible estimar confiablemente la biomasa total aérea (kg) en árboles de *Pinus chiapensis* a partir de variables de inventario o de volumen.

**Palabras clave:** modelos de regresión, muestreo destructivo, peso específico.

## Introducción

La estimación por procedimientos dendrométricos comunes del volumen y biomasa de árboles individuales medidos en un inventario forestal resulta hasta cierto punto tediosa. La dificultad en la determinación directa de estas variables hace conveniente contar con expresiones matemáticas que basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permitan estimar el volumen y biomasa de los árboles sobre la base de mediciones simples (Prodan *et al.*, 1997; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012).

Cerca de 30% de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) en México son producto de la destrucción de los bosques y selvas, como consecuencia del cambio de uso de suelo, situación que se complica ya que una molécula de CO<sub>2</sub> puede permanecer en el ambiente de 50 a 200 años antes de degradarse (Ordoñez, 2001). En general, los ecosistemas forestales poseen un potencial intermedio para revertir la contaminación de los GEI, mediante la captura de C o secuestro, que es la fijación de este elemento en la biomasa y suelos forestales, así como en suelos agrícolas u otro tipo de vegetación (Toribio, 2006). Las plantas utilizan CO<sub>2</sub> y liberan O<sub>2</sub> durante el proceso de la fotosíntesis; a diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se deben considerar como reservas naturales de carbono (Acosta *et al.*, 2002).

Los estudios de captura de carbono se basan en la estimación de la materia seca o biomasa de la vegetación, por ello, su estimación en los árboles es un aspecto esencial para estudios de almacenamiento y flujo de C en ecosistemas forestales. En este sentido, el modelaje es una herramienta muy útil en la búsqueda de una producción sustentable en la vegetación forestal (Díaz y Romero, 2004; Acosta *et al.*, 2011; Méndez *et al.*, 2011).

by the quotient of the model from biomass and total tree volume with bark ( $BEF_{vcc} = 1040.771 \times ND^{0.15073} \times TH^{0.42946}$ ). With this equation, it is possible to estimate reliably, the total aboveground biomass (kg) in trees of *Pinus chiapensis* from of inventory variables or volume.

**Keywords:** regression models, destructive sampling, specific gravity.

## Introduction

The estimation by common dendrometric procedures of volume and biomass of individual trees measured in a forest inventory becomes somewhat tedious. The difficulty in the direct determination of these variables makes convenient to count with mathematical expressions based on a sample objectively selected and carefully measured, allowing to estimate the volume and tree biomass based on simple measurements (Prodan *et al.*, 1997; Rodríguez -Ortiz *et al.*, 2012).

About 30% of the emission of greenhouse gases (GHG) in Mexico are product of the destruction of forests and jungles, as a result of land use change, a situation that is complicate since a CO<sub>2</sub> molecule can remain in the environment from 50 to 200 years before degraded (Ordoñez, 2001). In general, forest ecosystems posses an intermediate potential to reverse GHG pollution by capturing or kidnapping of C, which is the fixation of this element in biomass and forest soils, thus agricultural soils or other vegetation types (Toribio, 2006). Plants use CO<sub>2</sub> and release O<sub>2</sub> during the photosynthesis; unlike annual species, trees store the photoassimilates in carbon components in their woody structures for long periods, so that should be considered as natural carbon reserves (Acosta *et al.*, 2002).

Carbon capture studies are based on the estimation of dry matter or biomass of vegetation, therefore its estimation on trees is an essential aspect for studies of storage and flow of C in forest ecosystems. In this sense, modeling is a very useful tool in the search for sustainable production in forest vegetation (Díaz and Romero, 2004; Acosta *et al.*, 2011; Méndez *et al.*, 2011).

C plays an important role in physical-chemical processes of the planet through its cycle. Being the capture and emission processes, part of a system of four reservoirs of C

El C cumple un papel importante en los procesos fisicoquímicos del planeta a través de su ciclo. Siendo los procesos de captura y emisión, parte de un sistema de cuatro reservorios de C (vegetación-aérea y radical, materia de descomposición y suelos) con tiempos de residencia y flujos asociados (Pretty *et al.*, 2002). Por ello, se requiere del conocimiento de diversos métodos de estimación de volumen-biomasa, como el muestreo destructivo que utiliza ecuaciones de predicción mediante variables de inventario de fácil medición, como diámetro y altura de los árboles (Brown, 2001; Acosta *et al.*, 2002). Además, los estudios que conllevan la determinación de biomasa permiten el conocimiento de la densidad básica de la madera, así como la medición y estimación de área foliar (parámetro importante en el proceso fotosintético, respiración y transpiración) la cual es utilizada en los modelos de cobertura vegetal a nivel global (Brown *et al.*, 1989; Cano y Velázquez, 1996).

Los factores de expansión de biomasa (FEB) utilizan los volúmenes o existencias reales provenientes de los inventarios forestales para estimar biomasa y carbono (Schroeder *et al.*, 1997). Según Somogyi *et al.* (2006), el FEB se refiere a un coeficiente que expande el volumen comercial o total del fuste para obtener la biomasa total del árbol. Es decir, es la proporción directa entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste. Éste factor variable depende de la especie, las condiciones ambientales, la densidad y edad de la vegetación, entre otros aspectos y se utiliza para estimar la biomasa total de un árbol cuando únicamente se cuenta con datos de volumen del fuste (Aalde *et al.*, 2006).

Por ello, es importante no solamente la obtención de madera, sino también la producción de agua, tanto en cantidad como en calidad, el impacto ambiental de las operaciones de extracción de madera, la conservación de la biodiversidad, la relación de los bosques con otros recursos, etc. Todas ellas, razones suficientes para integrar herramientas que permitan al administrador forestal, identificar y considerar factores diversos simultáneos en espacio y en tiempo (Rojo, 2003). En el caso concreto, los FEB permitirían la estimación rápida y confiable de la biomasa total aérea en árboles y rodales de *Pinus chiapensis*.

El objetivo fue generar factores de expansión de biomasa aérea dependientes del tamaño del árbol, mediante modelos alométricos y aplicables a datos de inventario para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen, del norte de Oaxaca.

(aboveground vegetation and radical, rotting and soil) with residence times and associated flows (Pretty *et al.*, 2002). Therefore, it requires knowledge of various methods of estimating volume-biomass, such as destructive sampling using prediction equations using inventory variables easily measured, such as diameter and height of trees (Brown, 2001; Acosta *et al.*, 2002). Besides, the studies involving the determination of biomass allow knowledge of basic density of the wood, as well as measurement and estimation of leaf area (important parameter in the process of photosynthesis, respiration and transpiration) which is used in models of vegetative cover globally (Brown *et al.*, 1989, Cano and Velázquez, 1996).

The biomass expansion factors (BEF) use volumes or actual stocks from forest inventories to estimate biomass and carbon (Schroeder *et al.*, 1997). According to Somogyi *et al.* (2006), BEF refers to a coefficient which expands trunk volume or total trunk to obtain total tree biomass. I.e. is the direct proportion between the total aboveground biomass and trunk biomass. This variable factor depends on the specie, environmental conditions, density and age of vegetation, inter alia and is used to estimate the total biomass of a tree when there is only data from trunk volume (Aalde *et al.* 2006).

It is therefore important, not only to obtain wood, but also water production, both in quantity and quality, the environmental impact of logging operations, conservation of biodiversity, the relationship of forests with other resources, etc.. All of them, reasons enough to integrate tools allowing the forest manager, identify and consider various factors, simultaneously in space and time (Rojo, 2003). In the specific case, the BEF allow fast and reliable estimation of total aboveground biomass in trees and stands of *Pinus chiapensis*.

The objective was to generate aboveground biomass expansion factors dependant of tree size by allometric models and applicable to inventory data for *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen in northern Oaxaca.

## Materials and methods

### Study area

The study population is located in the community of San Juan Tabaa of the northern highland of Oaxaca. Natural stands of *Pinus chiapensis* are under logging in an environmental

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La población objeto de estudio se encuentra en la comunidad de San Juan Tabaá de la Sierra Norte de Oaxaca. Los rodales naturales de *Pinus chiapensis* están bajo aprovechamiento forestal en una unidad de manejo ambiental, ya que es una especie bajo protección especial (Pr) en la NOM-059-SEMARNAT-2010. La calidad de sitio es variable sobre terrenos con pendientes entre 20 y 70%.

### Muestreo destructivo

En áreas de corta de la anualidad 2012 se realizó un muestreo aleatorio utilizando 10 unidades de muestreo circulares de 400 m<sup>2</sup>. En ellas, se midieron datos de altura total (AT, m) y diámetro normal (DN, cm) de los árboles. Los datos se agruparon en clases diamétricas y de altura comerciales tomando como diámetro mínimo 12 cm, con intervalos de 5 cm y para alturas, con intervalos de 5 m. Se seleccionaron aleatoriamente 70 árboles de *P. chiapensis* en forma proporcional a la frecuencia de las categorías diamétricas y de alturas. Los árboles seleccionados fueron aquellos sanos y libres de plagas, considerando por lo menos cinco árboles por categoría diamétrica para cubrir todo el rango de distribución y que fueran representativos de la población.

El derribo se realizó con motosierra marca Husqvarna XP<sup>®</sup> cortando lo más cerca del suelo posible para aprovechar el máximo volumen del arbolado. Se determinaron las siguientes variables: NA (número de árbol), DN, DP (diámetro al pie, cm), DT (diámetro de tocón, cm), AT, grosor de corteza (GC, mm), altura del tocón (AT, cm) y AC (altura comercial, m).

Se separaron las ramas del fuste y se cortaron trozas comerciales de 2.62 m de longitud, hasta el diámetro mínimo comercial (12 cm). En cada troza se midió diámetro inicial y final (cm), GC y longitud de troza (LT, m). El volumen total y comercial con y sin corteza del fuste se calculó utilizando el método de trozas traslapadas (Bailey, 1995).

Las acículas se separaron de las ramas y se obtuvo peso verde (PV, kg) de ambos componentes para los 70 árboles, utilizando báscula electrónica Torrey<sup>®</sup>, serie EQB/EQM (Houston, TX, USA). De una muestra aleatoria de cinco árboles se extrajeron tres rodajas en la parte baja, media y

management unit, as it is a specially protected species (Pr) in NOM-059-SEMARNAT-2010. The quality of the site is variable on land with slopes between 20 and 70%.

### Destructive sampling

In logging areas in 2012 random sampling was made using 10 circular sample units 400 m<sup>2</sup>. On these, data measured for total height (TH, m) and normal diameter (ND, cm) of trees. Data were grouped into diameter classes and commercial high taking as minimum diameter 12 cm, with intervals of 5 cm and for heights, with intervals of 5 m. 70 trees of *P. chiapensis* were randomly selected in proportion to the frequency of diameter and heights categories. The trees selected were those healthy and free of pests, considering at least five trees per diameter category to cover the entire range of distribution and were representative of the population.

The cutting was carried out with a chainsaw Husqvarna XP<sup>®</sup> cutting as close as possible to the ground to get the maximum volume of tree. The following variables were determined: NA (number of tree), DN, DP (diameter at the base, cm), DT (stump diameter, cm), AT, bark thickness (GC, mm), stump height (AT, cm) and AC (commercial height, m).

Branches were separated from the trunk and cut commercial logs of 2.62 m length, to the minimum commercial diameter (12 cm). In each log was measured initial and final diameter (cm), GC and log length (LT, m). The total volume and tradable with and without trunk bark was calculated using the overlapping bolt method (Bailey, 1995).

The acicular were separated from the branches and obtained fresh weight (PV, kg) of both components for the 70 trees, using electronic scales Torrey<sup>®</sup>, series EQB / EQM (Houston, TX, USA). From a random sample of five trees were extracted three slices from the bottom, middle and top of the trunk, with a thickness of about 5 cm. Each slice was identified by tree with progressive numbers and stored in paper bags. Branches biomass was made similarly in the five trees, where each component was sampled and PV.

From each slice was determined PV in field and fresh volume (VV, cm<sup>3</sup>) by displacement of water in the laboratory. The slices were introduced into a drying oven Shel Lab FX14<sup>®</sup> (Cornelius, OR, USA) at a temperature of 100 °C until constant weight. The dry weight (PS, g), was obtained with an analytical balance Sartorius<sup>®</sup> SAR TALENT1 model (Miami, FLA, USA) and was determined the specific gravity

superior del fuste, con un grosor aproximado de 5 cm. Cada rodaja fue identificada por árbol con números progresivos y guardadas en bolsas de papel. La biomasa de ramas se realizó de igual forma en los cinco árboles, donde se obtuvieron muestras de cada componente y PV.

De cada rodaja, se determinó PV en campo y el volumen verde (VV, cm<sup>3</sup>) por desplazamiento de agua en laboratorio. Las rodajas fueron introducidas en la estufa de secado Shel Lab FX14® (Cornelius, OR., USA.) a una temperatura de 100°C hasta alcanzar su peso constante. El peso seco (PS, g), se obtuvo con una balanza analítica Sartorius® modelo SAR TALENT1 (Miami, FLA, USA) y se determinó la gravedad específica ( $GE = PS/VV$ , g cm<sup>-3</sup>). La biomasa en madera se obtuvo del producto de GE (kg m<sup>-3</sup>) y VV de cada troza. La suma de los pesos secos de las trozas generó la biomasa total en madera con corteza por árbol.

Hojas y ramas fueron secadas en estufa de secado a 75 °C hasta alcanzar peso constante y así obtener PS. Con estos datos se obtuvo un factor de conversión a biomasa de ambos componentes (PS/PV), que se utilizó para determinar la biomasa en ramas y follaje, mediante el producto de este factor promedio por el PV de todo el componente por árbol. De ésta forma, se determinó la biomasa de cada componente aéreo y su total por árbol

### Obtención de tablas de volumen y factores de expansión de biomasa (FEB)

Para calcular el volumen total por árbol se incluyó tocón, fuste total, ramas con diámetro mínimo comercial y ramas pequeñas. El volumen comercial incluyó fuste y ramas con diámetro mínimo de 12 cm.

Para volúmenes y biomasa se ajustaron modelos regresión que ayudaron a predecir los valores por árbol en función al DN y AT, que fueron las variables independientes de mayor importancia y que son utilizadas en inventarios forestales comunes.

Los FEB variables se obtuvieron mediante el cociente de biomasa total aérea y volumen total árbol con corteza:

$$FEB = \frac{MB}{MV} \left[ \frac{\text{Mg ha}^{-1}}{\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}} \right]$$

Donde: FEB= factor de expansión de biomasa, MB= modelo de biomasa, MV= modelo de volumen

( $GE = PS/VV$ , g cm<sup>-3</sup>). Wood biomass was obtained from the product of GE (kg m<sup>-3</sup>) and VV of each log. The sum of the dry weights of the logs generated total biomass in wood with bark per tree.

Leaves and branches were dried in oven at 75 °C until constant weight and thus obtain PS. With these data was obtained a conversion to biomass of both components (PS/PV), which was used to determine the biomass in branches and foliage, by the product of the average factor per PV of the entire component per tree. In this way, biomass was determined the biomass for each component aboveground and its total per tree.

### Obtaining volume tables and biomass expansion factors (BEF)

To calculate the total volume per tree was included the stump, total trunk, branches with minimum commercial diameter and twigs. The trade volume included trunk and branches with minimum diameter of 12 cm.

For volumes and biomass, regression models were adjusted to help predict tree values per tree according to DN and AT, which were the most important independent variables and that are used in common forest inventories.

The BEF variables were obtained by the quotient of total aboveground biomass and total tree volume with bark:

$$BEF = \frac{MB}{MV} \left[ \frac{\text{Mg ha}^{-1}}{\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}} \right]$$

Where: BEF = biomass expansion factor, MB = biomass model, MV = volume model

### Data analysis

The information collected in the field was concentrated in a database on a spreadsheet from Excel. In the data were checked for assumptions of normality and homogeneity of variance with the UNIVARIATE procedure. Equations were tested to define the model with the best goodness of adjustment for prediction of volume per tree using as independent variables DN and AT. For total tree biomass, were selected by the STEPWISE procedure, the variables of higher statistical significance and greater use in forest inventories; which were used in linear and nonlinear regression models. Regression models were executed



## Análisis de datos

La información recabada en campo se concentró en una base de datos de hoja de cálculo Excel. En los datos se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con el procedimiento UNIVARIATE. Se probaron ecuaciones para definir el modelo con la mejor bondad de ajuste para la predicción de volumen por árbol utilizando como variables independientes DN y AT. Para biomasa total árbol, se seleccionaron mediante el procedimiento STEPWISE las variables de mayor significancia estadística y de mayor uso en inventarios forestales, las cuales se utilizaron en los modelos de regresión lineal y no lineal. Los modelos de regresión fueron ejecutados mediante los procedimientos GLM y MODEL. Se obtuvieron valores promedio y variabilidad por categoría diamétrica para las variables evaluadas, utilizando los procedimientos MEANS y FREQ. Todos los procedimientos fueron realizados en el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004).

## Resultados y discusión

### Modelos de volumen y biomasa

El volumen total con corteza por árbol (VT) generó el mejor coeficiente de determinación ajustado ( $R^2=0.94$ ) mediante el modelo de Spurr Potencial. Se utilizaron variables de inventario como diámetro normal (DN) y altura total (AT) como variables independientes. Ambos parámetros de la ecuación mostraron errores estándar (EE) inferiores a 0.03 y significancia  $p \leq 0.003$ . Los estimadores de este modelo fueron comprobados con la tendencia de los residuales, así como otros criterios estadísticos que evalúan la calidad de los parámetros. Este modelo mostró la menor variación en el volumen estimado de los árboles de *Pinus chiapensis*.

La estimación de biomasa aérea total (BT) de los árboles mostró su mejor ajuste con el modelo de Schumacher Hall, utilizando las mismas variables independientes que en el volumen. La pseudo- $R^2$  mostró un valor de 0.95, desviación estándar de 137.1; los parámetros del modelo mostraron EE  $\leq 0.18$ , con significancia estadística  $p \leq 0.05$ . La estructura de ambos modelos fue la siguiente:

$$VT = 0.000227 \times (DN^2 \times AT)^{0.9105} \dots \text{Spurr Potencial}$$

$$BT = 0.236255 \times DN^{1.97173} \times AT^{0.48104} \dots \text{Schumacher Hall}$$

by GLM and MODEL procedures. Average values and variability per diametric category were obtained for the variables evaluated, using the MEANS and FREQ procedures. All procedures were performed in SAS statistical package (SAS Institute Inc., 2004).

## Results and discussion

### Volume and biomass models

The total volume with bark per tree (VT) generated the best adjusted coefficient of determination ( $R^2=0.94$ ) by the Spurr potential model. Inventory variables were used like normal diameter (DN) and total height (AT) as independent variables. Both parameters of the equation showed standard errors (EE) of less than 0.03 and significance  $p \leq 0.003$ . The estimates of this model were tested with the trend of the residuals, thus other statistical criteria that assess the quality of the parameters. This model showed the least variation in volume estimated of *Pinus chiapensis*.

The estimation of total aboveground biomass (BT) of trees showed their best goodness with the model of Schumacher Hall, using the same independent variables that in volume. The pseudo- $R^2$  showed a value of 0.95, standard deviation of 137.1; the model parameters showed EE  $\leq 0.18$ , with statistical significance  $p \leq 0.05$ . The structure of both models was the following:

$$VT = 0.000227 \times (DN^2 \times AT)^{0.9105} \dots \text{Spurr Potencial}$$

$$BT = 0.236255 \times DN^{1.97173} \times AT^{0.48104} \dots \text{Schumacher Hall}$$

Where: VT= total volume of wood with bark ( $m^3$ ); BT= total aboveground biomass (kg); DN= normal diameter to 1.30 m (cm); AT= total height (m).

Schumacher Hall model has shown statistical parameters of excellent goodness of fit in the prediction of trunk volumes for *Pinus teocote* Schl. *et* Cham (Tapia and Nívar, 1998), specie similar to the studied. In other cases, it has been used for developing volume tables for the species *P. lawsonii* Roezl., *P. oocarpa* Shiede and other pine species and broad leaf (Bailey, 1994; Nívar *et al.* 1997; Velarde, 2002; Safe and Kanninen, 2005; Corral and Nívar, 2009), showing best adjust in the analysis of variance. In some species has been used the logarithmic model using as the

Donde: VT= volumen total de madera con corteza (m<sup>3</sup>); BT= biomasa total aérea (kg); DN= diámetro; normal a 1.30 m (cm); AT= altura total (m).

El modelo de Schumacher Hall ha mostrado parámetros de estimación estadística de excelente bondad en la predicción de volúmenes fustales para *Pinus teocote* Schl. et Cham (Tapia y Nívar, 1998), especie de crecimiento similar a la estudiada. En otros casos, se ha utilizado para la elaboración de tablas de volumen para las especies *P. lawsonii* Roetzl., *P. oocarpa* Shiede y otras especies de pino y latifoliadas (Bailey, 1994; Nívar *et al.*, 1997; Velarde, 2002; Segura y Kanninen, 2005; Corral y Nívar, 2009), mostrando mejores ajustes en el análisis de varianza. En algunas especies se ha utilizado el modelo logarítmico usando como única variable independiente al diámetro del árbol, aunque los coeficientes de determinación han sido un poco menores (Acosta *et al.*, 2011).

Los coeficientes de ajuste y otros estadísticos de bondad de los modelos utilizados para *P. chiapensis*, mostraron los mejores resultados cuando se involucraron al mismo tiempo las variables de diámetro y altura, situación que muestra amplia coincidencia con los estudios mencionados.

Éstos modelos de volumen también han sido utilizados para estimar la cantidad de biomasa y carbono en fuste de otras especies, donde los valores de R<sup>2</sup>, error estándar de estimación y distribución de residuales fueron similares a los encontrados en el presente estudio (Moreno *et al.*, 2011). Por ejemplo, la biomasa total para *Pinus cooperi* Blanco se estimó con R<sup>2</sup>= 0.97 y error estándar bajo utilizando un modelo lineal que empleó diámetro de base (DB) y altura total (Arroyo y Paredes, 2006).

Aunque para otras especies de crecimiento diferente (*Quercus*) se han encontrado los mismos ajustes utilizando únicamente DN como variable predictora (Deans *et al.*, 1996). En especies de pino donde solo se ha empleado DN en la estimación de biomasa se ha encontrado R<sup>2</sup>= 0.89 (Sanquetta *et al.*, 2002). El utilizar DN y AT al mismo tiempo para la predicción de biomasa de *P. chiapensis* se justifica ampliamente, ya que esto originó una mayor confiabilidad (R<sup>2</sup>= 0.95), que si se hubiera incluido una sola variable.

### Factores de expansión de biomasa (FEB)

Los FEB se obtuvieron mediante el cociente de los modelos de biomasa total (BT) y volumen total (VT), que generó la ecuación:

only independent variable the diameter of the tree, although the determination coefficients were slightly lower (Acosta *et al.*, 2011).

Adjustment coefficients and other statistical goodness of the models used for *P. chiapensis*, showed the best results when were engaged at the same time the diameter and height variables, situation that shows broad agreement with these studies.

These volume models have also been used to estimate the amount of biomass and carbon in trunk from other species, where R<sup>2</sup> values, standard error of estimate and residual distribution were similar to those found in the present study (Moreno *et al.* 2011). For example, total biomass for *Pinus cooperi* Blanco was estimated with R<sup>2</sup>= 0.97 and low standard error using a linear model that used base diameter (DB) and total height (Arroyo and Paredes, 2006).

Although for other species of different growth (*Quercus*) have been found the same adjustments using only DN as a predictor variable (Deans *et al.*, 1996). In pine species were has been used only DN in biomass estimation has found R<sup>2</sup>= 0.89 (Sanquetta *et al.*, 2002). Using DN and AT at the same time for biomass prediction of *P. chiapensis* is largely justified, as this originated higher reliability (R<sup>2</sup>= 0.95), than if it had been included a single variable.

### Biomass expansion factors (BEF)

The BEF were obtained by the quotient of the total biomass models (BT) and total volume (VT), generating the equation:

$$BEF = 1040.771 \times DN^{0.15073} \times AT^{0.42946}$$

Where: BEF= biomass expansion factor for the total volume with bark (kg m<sup>-3</sup>); DN and AT already defined.

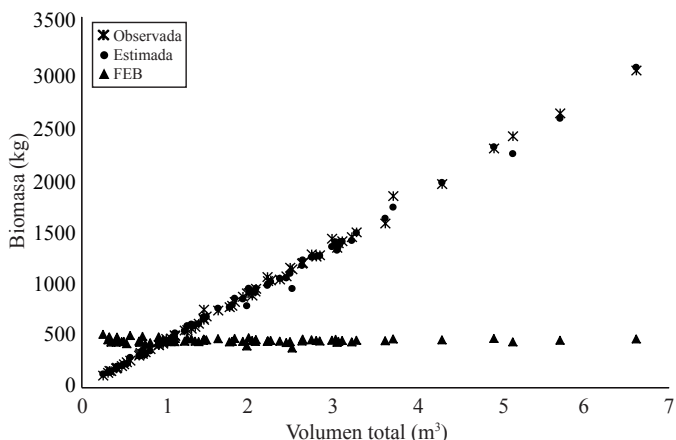
With the model obtained, it is possible to construct a variable table of biomass expansion factors. Through them, can be estimated the amount of accumulated total aboveground biomass of a tree, using height and normal diameter of the individuals. The BEF decreases as total aboveground biomass (observed or estimated) of *Pinus chiapensis* increases (Figure 1, Table 1) this is consistent with studies by Schroeder *et al.* (1997) and Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012). The volume of wood with smaller bark per tree (0.699 m<sup>3</sup>) generated an estimated BEF of 21.44 kg lower than the observed. Thus, it can be inferred that BEF generate high error in small-sized trees (Tables 1 and 2). However, the average per tree with DN= 27.7

$$FEB = 1040.771 \times DN^{0.15073} \times AT^{-0.42946}$$

Donde: FEB= factor de expansión de biomasa para el volumen total con corteza (kg m<sup>-3</sup>); DN y AT ya definidas.

Con el modelo obtenido, es posible la elaboración de una tabla de factores de expansión de biomasa variables. Mediante ellos, puede estimarse la cantidad de biomasa total aérea acumulada de un árbol, empleando altura y diámetro normal de los individuos. Los FEB decrecen conforme la biomasa total aérea (observada o estimada) de *Pinus chiapensis* se incrementa (Figura 1, Cuadro 1), esto coincide con los estudios realizados por Schroeder *et al.* (1997) y Rodríguez-Ortiz *et al.* (2012). El volumen de madera con corteza más pequeño por árbol (0.699 m<sup>3</sup>) generó un FEB estimado, 21.44 kg inferior al observado. Con ello, puede inferirse que los FEB generan mayor error en árboles de dimensiones pequeñas (Cuadros 1 y 2). Sin embargo, el promedio por árbol con DN= 27.7 cm y AT = 23.3 m, arroja un FEB= 444.14 kg (Cuadro 1), y éste valor multiplicado por el volumen promedio por árbol (1.918 m<sup>3</sup>) proporciona una biomasa aérea total de 851.71 kg para este individuo; valor que conlleva una subestimación de solo 7.62 kg con respecto a la biomasa total aérea observada (859.33 kg).

cm and AT= 23.3 m, resulting in a BEF= 444.14 kg (Table 1), and this value multiplied by the average volume per tree (1,918 m<sup>3</sup>) provides a total biomass of 851.71 kg for this individual; value which leads to an underestimation of 7.62 kg regarding the total aboveground biomass observed (859.33 kg).



**Figura 1. Volumen total con corteza, biomasa total aérea estimada y observada y factores de expansión de biomasa (FEB) para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen.**

**Figure 1. Total volume with bark, total aboveground biomass estimated and observed and biomass expansion factors (BEF) for *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen.**

**Cuadro 1. Volumen total, partición de biomasa aérea y factores de expansión de biomasa para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen de la Sierra Norte de Oaxaca.**

**Table 1. Total volume, aboveground biomass partitioning and biomass expansion factors for *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen on the northern highlands of Oaxaca.**

Categoría diamétrica (cm)	Volumen total (m <sup>3</sup> )	Partición de biomasa (%)			FEB	Biomasa estimada por FEB (kg)
		Hojas	Ramas	Madera con corteza		
10	0.699	1.8	10.1	88.1	437.74	306.05
15	0.438 ± 0.12	1.6	5.9	92.5	448.95	196.71
20	0.904 ± 0.13	1.0	5.6	93.4	438.07	395.87
25	1.410 ± 0.25	1.0	4.6	94.4	446.52	629.74
30	2.091 ± 0.27	1.1	6.0	92.8	432.62	904.65
35	2.904 ± 0.20	1.0	6.6	92.3	440.27	1278.41
40	3.230 ± 0.97	1.3	8.8	90.0	450.76	1455.90
45	5.137	0.8	9.8	89.3	429.22	2204.99
50	5.307 ± 0.55	0.8	8.8	90.4	453.62	2407.37
55	6.611	0.6	8.2	91.2	456.95	3020.80
Promedios	1.918	1.2	6.3	92.6	444.14	851.71

FEB= factor de expansión de biomasa. Para volumen total, la media se acompaña de ± la desviación estándar para las clases de diámetro con tamaños de muestra superior a 1.



**Cuadro 2. Tamaño de muestra por categoría diamétrica, variables dasométricas y biomasa del componente aéreo en árboles de *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen de la Sierra Norte de Oaxaca.****Table 2. Sample size by diameter category, dasometric variables and aboveground biomass component in trees *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen in the northern Highland of Oaxaca.**

CD (cm)	n <sup>†</sup>	DN (cm)	AT (m)	Biomasa (kg)			
				Hojas	Ramas	Fuste con corteza	Total
10	1	11.5	17.7	5.90	33.01	288.58	327.49
15	12	15.1 ± 1.4	18.4 ± 2.6	2.96 ± 0.5	11.37 ± 4.4	180.85 ± 50.7	195.18 ± 53.1
20	11	20.8 ± 1.4	21.8 ± 2.2	4.14 ± 1.3	22.12 ± 7.4	373.00 ± 57.3	399.26 ± 61.3
25	10	24.9 ± 1.1	22.2 ± 1.4	6.25 ± 2.4	29.21 ± 13.6	582.12 ± 106.6	617.58 ± 116.9
30	16	30.3 ± 1.5	25.6 ± 3.9	10.54 ± 4.3	57.12 ± 24.5	863.11 ± 113.0	930.77 ± 128.0
35	10	35.3 ± 1.2	25.9 ± 1.3	13.51 ± 3.4	86.23 ± 28.6	1198.52 ± 85.1	1298.25 ± 92.9
40	6	39.0 ± 1.6	25.4 ± 0.8	18.18 ± 12.4	120.12 ± 62.7	1333.16 ± 400.4	1471.46 ± 418.7
45	1	45.0	29.9	20.02	232.80	2120.42	2373.25
50	2	48.8 ± 0.3	27.1 ± 1.5	20.02 ± 4.9	212.65 ± 1.6	2190.51 ± 230.5	2423.18 ± 233.8
55	1	53.0	27.4	27.39	245.95	2728.65	2992.52
Promedios		27.7	23.3	9.15	58.66	791.53	859.33

<sup>†</sup>Número de árboles muestreados por clase diamétrica. CD= categoría diamétrica; DN= diámetro normal, AT= altura total. La media se acompaña de ± la desviación estándar, excepto para CD con n= 1.

Los FEB obtenidos son dependientes del tamaño del árbol, al involucrar diámetro y altura del mismo. Por ello, la biomasa contenida en hojas en árboles pequeños (DN= 10 cm) fue superior (5.90 kg) que en árboles de categorías de diámetro mayores (15 y 20 cm). La mayor variabilidad de este componente se encontró en árboles entre 37.5 y 42.5 cm de diámetro. En promedio, esta especie contiene 9.15 kg de biomasa de follaje/árbol (Cuadro 2). Los recursos (carbohidratos) que los árboles destinan a la formación de hojas (1.8% de la biomasa total aérea- BT-) fue superior en individuos pequeños (CD= 10 cm). En árboles adultos (CD= 55 cm), las hojas sólo constituyen 0.6% de BT, donde el FEB fue el mayor (Cuadro 1).

Árboles pequeños (entre 7.5 y 12.5 cm de diámetro) donde los FEB son pequeños, poseen más biomasa en ramas (33.0 kg/ árbol) que aquellos de categorías entre 15 y 25 cm de diámetro. La mayor variabilidad se encontró en árboles con CD= 40 cm. Árboles de *Pinus chiapensis* tienen en promedio 58.66 kg de biomasa en ramas (Cuadro 2). Las ramas, al igual que las hojas, mostraron el mayor contenido en árboles pequeños (CD= 10 cm) con 10.1% de la BT, mientras que en árboles adultos (CD= 45 cm) se reduce a 9.9%. La menor proporción de biomasa en ramas se encontró en árboles de diámetro promedio de 25 cm, con FEB= 446.52 y fue también la categoría que mostró la mayor proporción de madera con corteza (94.4%). Árboles pequeños, por consiguiente tienen poca prioridad en la formación de madera y corteza (Cuadro 1).

The FEB obtained is dependent on the size of the tree, by involving diameter and height. Therefore, the biomass contained in leaves of small trees (DN= 10 cm) was higher (5.90 kg) than in trees of larger diameter categories (15 and 20 cm). The greater variability of this component was found in trees between 37.5 and 42.5 cm in diameter. On average, this species contains 9.15 kg of biomass of foliage / tree (Table 2). Resources (carbohydrates) that trees allocated to leaf formation (1.8% of the total aboveground biomass-BT) was higher in young individuals (CD= 10 cm). In adult trees (CD= 55 cm), leaves constitute just 0.6% of BT, where BEF was the highest (Table 1).

Small trees (between 7.5 and 12.5 cm in diameter) where BEF are small have more biomass in branches (33.0 kg / tree) than those of categories between 15 and 25 cm in diameter. The highest variability was found in trees with CD= 40 cm. Trees *Chiapensis Pinus* have on average 58.66 kg of biomass in branches (Table 2). Branches, like the leaves, showed higher content in small trees (CD= 10 cm) with 10.1% of BT; while in adult trees (CD= 45 cm) is reduced to 9.9%. The lower proportion of biomass in branches was found in trees on average diameter of 25 cm, BEF= 446.52 and was also the category that had the highest proportion of wood with bark (94.4%). Small trees therefore have low priority in the formation of wood and bark (Table 1).

La biomasa en madera con corteza y biomasa total aérea mostró los mayores incrementos (59%) en árboles que pasaron de la categoría diamétrica de 40 a 45 cm. En promedio, los árboles destinan a la formación de madera con corteza 791.53 kg/árbol, generando un peso promedio de biomasa total aérea de 859.33 kg/árbol (Cuadro 2).

Los FEB disminuyen conforme aumenta el tamaño del árbol, es decir su biomasa ya que esta última es altamente dependiente del diámetro y altura del árbol (Dutca *et al.*, 2010). Éstos resultados concuerdan con los mostrados por Arredondo y Návar (2009) y Návar (2009), quienes desarrollaron modelos y factores de expansión de biomasa dependientes del tamaño del árbol, la densidad y la gravedad específica de la madera en *Pinus* spp. Gracia *et al.* (2004) y Teobaldelli *et al.* (2009) indicaron la misma variación encontrada en este trabajo para los FEB con respecto a la altura de árbol, ya que estos factores son dependientes, además de las variables mencionadas, de la edad, área basal, productividad o calidad del bosque y la composición de éste.

Al relacionar la biomasa total aérea (BTA) y la biomasa contenida en el volumen comercial de madera en la muestra evaluada de árboles de *P. chiapensis*, se determinó un factor de expansión de biomasa fijo de 2.46; el cual se redujo 1.08 al considerar la biomasa de volumen total. El primer valor obtenido se encuentra por arriba de los reportados por otros autores (Husch *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2008) para especies de *Pinus*, donde se determinó FEB de 1.37 para árboles pequeños procedentes de plantación. Valores más altos de estos FEB se han observado en bosques jóvenes, los cuales se asocian con menor densidad, ya que el rápido crecimiento del árbol se relaciona con una baja densidad de la madera (Snowdon *et al.*, 2000). Por otro lado, el valor inferior de FEB obtenido en este trabajo (1.08) puede atribuir al mayor peso relativo de ramas en relación al fuste de árboles jóvenes; en las especies de pino, éste y el follaje son dependientes de la edad (Lehtonen *et al.*, 2004).

La ventaja primordial de los FEB variables determinados para *P. chiapensis* es su aplicabilidad para cualquier combinación de diámetro normal y altura (individual o en categorías), situación que le intuye una alta versatilidad y confiabilidad para la estimación de biomasa y Carbono de rodales naturales (Van Camp *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2007). Los FEB fijos como los determinados en otros estudios (Levy *et al.*, 2004; Tobin y Nieuwenhuis, 2007; Pajtk *et al.*, 2008; Sanquetta, 2011), en muchos casos generan estimaciones de biomasa y Carbono inapropiados para bosques naturales,

The biomass in wood with bark and total aboveground biomass showed higher increases (59%) in trees that went pass of category of diameter from 40 to 45 cm. On average, the trees destine to the formation of wood with bark 791.53 kg/tree, generating an average weight of total aboveground biomass of 859.33 kg/tree (Table 2).

The BEF decrease as the size of the tree increase, i.e. its biomass since the latter is highly dependent on the diameter and height of the tree (Dutca *et al.*, 2010). These results agree with those shown by Arredondo and Návar (2009) and Návar (2009), who developed models and biomass expansion factors dependent on tree size, density and specific gravity of wood in *Pinus* spp. Grace *et al.* (2004) and Teobaldelli *et al.* (2009) indicated the same variation found in this work for BEF regarding tree height, as these factors are dependant, in addition to the above variables, age, basal area, forest productivity or quality and composition thereof.

By relating the total aboveground biomass (BTA) and the biomass contained in trade volume of wood in the sample evaluated of *P. chiapensis*, was determined a fixed BEF of 2.46; which was reduced to 1.08 considering total biomass. The first value obtained is found above those reported by other authors (Husch *et al.*, 2003; Domínguez *et al.*, 2008) for *Pinus*, where determined BEF 1.37 for small trees from stands. Higher values of these BEF have been observed in young forests, which are associated with lower density, since the rapid growth of the tree is related with a low density of wood (Snowdon *et al.*, 2000). On the other hand, the lower value obtained in this work for BEF (1.08) can be attributed to the higher relative weight of branches in relation to the trunk of young trees; in pine species, this and the foliage are age-dependent (Lehtonen *et al.*, 2004).

The primary advantage of the BEF variables determined for *P. chiapensis* is its applicability to any combination of normal diameter and height (individual or categories), a situation that senses high versatility and reliability for estimating biomass and carbon from natural stands (Van Camp *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2007). The fixed and determined BEF in other studies (Levy *et al.*, 2004; Tobin and Nieuwenhuis, 2007; Pajtk *et al.*, 2008; Sanquetta, 2011), in many cases generate estimates of biomass and carbon inappropriate for natural forests, since overestimates these items in small trees and underestimate them in mature individuals. Despite of the attributes mentioned for determined BEF, these should be applied for the studied species and under the conditions tested from natural stands (Jalkanen *et al.*, 2005).

ya que sobreestiman estos rubros en árboles pequeños y los subestiman en individuos adultos. A pesar de los atributos mencionados para los FEB determinados, estos deben ser aplicados para la especie estudiada y bajo las condiciones evaluadas de rodales naturales (Jalkanen *et al.*, 2005).

## Conclusiones

Los factores de expansión de biomasa variable (FEB) determinados para *Pinus chiapensis* en éste estudio pueden ser utilizados para estimar la biomasa total aérea por árbol o por unidad de superficie, empleando el volumen de madera total árbol. Todos los modelos empleados utilizan como variables predictoras a diámetro normal (DN, cm) y altura (AT, m) de árboles, ampliamente utilizadas en inventarios forestales.

Los rodales naturales de esta especie presentan una partición de biomasa aérea de 1.2% (9.15 kg), 6.3% (58.66 kg) y 92.5% (791.53 kg) para acículas, ramas y madera con corteza, respectivamente. Un árbol muestral promedio con DN= 27.7 cm y AT= 23.3 m, genera un volumen total árbol de 1.918 m<sup>3</sup> y biomasa total aérea de 851.71 kg con un FEB de 444.14.

Con estos factores es posible cuantificar la cantidad de carbono que capturan los bosques de *P. chiapensis* de la Sierra Norte de Oaxaca y calcular su productividad como sumideros de Carbono. Otro plus generado en el trabajo fue la obtención de tablas de volumen que estiman confiablemente esta variable, permitiendo un manejo integral de la especie.

## Literatura citada

- Aalde, H.; González, P.; Gytarsky, M.; Krug, T.; Kurz, W. A. y Oleg, S. 2006. Tierras Forestales. 1(93):15-16.
- Acosta, M. M.; Carrillo, A. F. y Gómez, V. R. G. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 2(4):529-543.
- Acosta, M. M.; Vargas, H. J.; Velásquez, M. A. y Etchevers, B. J. D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. Agrociencia. 36(6):725-736.
- Arredondo, S. F. M. y Návar, C. J. J. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 15(2):155-163.

## Conclusions

The variable biomass expansion factors (BEF) determined for *Pinus chiapensis* in this study can be used to estimate total aboveground biomass per tree or per unit area, using the total wood volume. All models used as predictor variables to normal diameter (DN, cm) and height (AT, m) of trees, widely used in forest inventories.

Natural stands of this species have a biomass partition of 1.2% (9.15 kg), 6.3% (58.66 kg) and 92.5% (791.53 kg) for acicular, branches and wood with bark, respectively. An average sample tree with DN= 27.7 cm and AT= 23.3 m, generates a total volume of 1,918 m<sup>3</sup> and total aboveground biomass of 851.71 kg with a BEF of 444.14.

With these factors it is possible to quantify the amount of carbon captured by forests of *P. chiapensis* of the northern highlands of Oaxaca and calculate their productivity as carbon sinks. Another plus was generated from this work was the obtaining of volume tables that reliably estimate this variable, allowing a comprehensive management of the species.

*End of the English version*



- 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, Pueblo Nuevo, Durango. Tesis Profesional. Instituto Tecnológico del Salto, Durango, México. 37 p.
- Bailey, R. L. 1994. A compatible volume-taper model based on the Schumacher and Hall generalized constant for factor volume equation. Forest Sci. 40:303-313.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volume from stem-analysis data and overlapping bolt method. Canadian J. Forest Res. 25:170-173.
- Brown, S. 2001. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environ. Pollution. 1(16):363-372.
- Brown, S.; Gillespie, A. J. and Lugo, A. E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Sci. 35(4):32-33.
- Cano, M. E. y Velásquez, M. A. 1996. Área foliar específica en *Pinus patula*: efectos del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. Agrociencia. 1(30):117-121.
- Corral, R. S. y Návar, C. J. J. 2009. Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. 15(1):5-13.
- Deans, J.; Mora, J. and Grace, J. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. Forest Ecol. Management. 88(3):215-225.
- Díaz, B. L. y Romero, C. 2004. Captura de carbono y la gestión forestal. Edit. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España. 79 p.

- Domínguez, C. G.; Calderón, O. A. A.; Pérez, J. J.; Lagunas, R. R. y Balderas, J. A. D. 2008. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15(1):59-64.
- Dutca, J.; Abrudan, J. V.; Stancioiu, P. T. and Blujdea, V. 2010. Biomass conversion and expansion factor for young Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) trees planted on non-forest lands in eastern Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj*. 38(3):286-292.
- Gracia, C.; Vayreda, J.; Sabaté, S. and Ibáñez, J. 2004. Main components of the aboveground biomass expansion factors. Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona. CREA. Centre de Recerca Ecológica and Aplicacions Forestals. Barcelona, Spain. 24 p.
- Husch, B.; Beers, T. W. and Kershaw, J. A. 2003. *Forest mensuration*. 4<sup>th</sup> Ed. Wiley, J. Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 443 p.
- Jalkanen, A.; Mäkipää, R.; Ståhl, G.; Lehtonen, A. and Petersson-H. 2005. Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors. *Annal. Forest Sci.* 62(8):845-851.
- Lehtonen, A.; Cienciala, E.; Tatarinov, F.; Sievänen, R. and Mäkipää, R. 2007. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. *Annal. Forest Sci.* 64:133-140.
- Lehtonen, A.; Mäkipää, R.; Heikkinnen, J.; Sievänen, R. and Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecol. Management*. 188:211-224.
- Levy, P. E.; Hale, S. E. and Nicoll, B. C. 2004. Biomass expansion factors and root-shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry*. 77(5):421-430.
- Méndez, G. J.; Luckie, N. L.; Capó, A. A. M. y Nájera, L. A. J. 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.
- Moreno, G. N.; Herrera, M. M. A. y Caraciolo, F. R. L. 2011. Modelo para cálculo estimación de carbono en tipo forestal roble-raulicoigüe en la Reserva Nacional Malleco- Chile. *Rev. Árvore*. 35(6):1299-1306.
- Návar, C. J. J. 2009. Allometric equations and expansion factors for tropical dry trees of eastern Sinaloa, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10:45-52.
- Návar, J. P.; Domínguez-Caballeros, A.; Contreras-Aviña, J. C. y Estrada, M. C. 1997. Ajuste de siete modelos de ahumamiento a los perfiles fustales de *Pinus hartwegii* Lindl. del noreste de México. *Agrociencia*. 31:73-81.
- Ordoñez, J. A. 2001. Captura de carbono en bosque templado: en el caso de San Juan Nuevo, Michoacán, México. INE-SEMARNAP. México. 72 p.
- Pajtík, J.; Konôpka, B. and Lukac, M. 2008. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies*[L.] Karst) trees. *Forest Ecol. Management*. 256(5):1096-1103.
- Pretty, J. N.; Ball, A.; Xiaoyun, S. L. y Rauindranath, N. H. 2002. The role of sustainable agriculture and renewable resource management in reducing greenhouse-gas emissions and increasing sinks in China and India. *Philosophical Transactions. Series A. Mathematical, Physical Eng. Sci.* 360(1797):1741-1761.
- Prodan, M. R.; Peters, F. C. y Real, P. 1997. *Mensura forestal. Proyecto IICA/GTZ, sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible*. San José de Costa Rica. 661 p.
- Rodríguez-Ortiz, G.; De Los Santos-Posadas, H. M.; González-Hernández, V. A.; Aldrete, 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. *Madera y Bosques*. 18(1):25-41.
- Rojo, M. G. 2003. Evaluación de rendimiento en plantaciones del árbol del hule (*Hevea brasiliensis maullarg.*) en México. *Agrociencia*. 1(94):449-456.
- Sanquetta, C. R.; Corte, A. P. D. and da Silva, F. 2011. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*. 6:1-8.
- Sanquetta, C. R.; Farinha, W. L. y Arce, E. D. 2002. Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea de *Pinus taeda* en el sur del estado de Paraná, Brasil. *Patagonia Forestal*. 8(1):1-9.
- SAS Institute Inc. 2004. *SAS/STAT 9.1 User's guide*. SAS Institute, Cary, N.C. USA. 4979 p.
- Schroeder, P. S.; Brown, J. M. Birdsey, R. and Cieszewski, C. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *Science*. 43(3):424-43.
- Segura, M. and Kanninen, M. 2005. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*. 37(1):2-8.
- Snowdon, P.; Eamus, D.; Gibbons, P.; Khanna, P. K.; Keith, H.; Raison, R. J. and Kirschbaum, M. U. F. 2000. Synthesis of allometrics. Review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies. National Carbon Accounting System Technical Report 17. Australian Greenhouse Office. Canberra. Australia. 113 p.
- Somogyi, Z.; Ciencia, E.; Muukkonen, P.; Lehtonen, A. and Weiss, P. 2006. Indirect methods of large scale forest biomass estimation. *European J. Forest Res.* 3:11-13.
- Tapia, J. y Návar, J. 1998. Ajustes de modelos de volumen y funciones de ahumamiento para *Pinus teocote* en bosques de Pino de la Sierra Madre Oriental. *Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12(1):1-12.
- Teobaldelli, M.; Somogyi, Z.; Migliavacca, M. and Usoltsev, V. A. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecol. Management*. 257(3):1004-1013.
- Tobin, B. and Nieuwenhuis, M. 2007. Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Ireland. *European J. Forest Res.* 126(2): 189-196.
- Toribio, M. M. E. 2006. Almacenamiento de carbono en raíces de plantas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Oaxaca, México. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Texcoco, Estado de México. 36 pp.
- Van Camp, N.; Vande Walle, I.; Mertens, J.; De Neve, S.; Samson, R.; Lust, R.; Lemeur, R.; Boeckx, P.; Lootens, P.; Beheydt, D.; Mestdagh, I.; Sleutel, S.; Verbeeck, H.; Van Cleemput, O.; Hofman, G. and Carlier, L. 2004. Inventory-based carbon stock of Flemish forests: a comparison of European biomass expansion factors. *Annal. Forest Sci.* 61:677-682.
- Velarde, R. C. J. 2002. Estudios de crecimiento y elaboración de tablas de volumen para *Pinus lawsonii* y *Pinus oocarpa*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Texcoco, Estado de México. 59-62 pp.