

# MODELOS PARA ESTIMACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. EN PROCESO DE DECLINACIÓN

## BIOMASS ESTIMATION AND DISTRIBUTION MODELS OF *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. IN DECLINE

Patricia Flores-Nieves<sup>1</sup>, Miguel Ángel López-López<sup>1</sup>, Gregorio Ángeles-Pérez<sup>1</sup>,  
María de Lourdes de la Isla-Serrano<sup>2</sup> y Germán Calva-Vásquez<sup>3</sup>

### RESUMEN

Actualmente, el gobierno federal promueve el pago por captura de carbono en los bosques para mitigar el calentamiento global. Por ello, existe la necesidad de estimar la biomasa y tasas de captura de carbono en los bosques de *Abies religiosa*. En este estudio se generaron modelos para calcular la biomasa de fuste, de madera de ramas y de acículas de árboles completos y de ramas de oyamel en rodales del Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. Para el caso de árboles completos, la biomasa estuvo en función del diámetro normal (DN), mientras que para ramas individuales fue una función del diámetro basal (DB). El uso de los modelos generados a nivel árbol se recomienda para árboles con DN entre 12 y 105 cm, y cambio los modelos a nivel de ramas se recomiendan para diámetros basales entre 1 y 120 mm. El modelo para fustes fue de tipo potencial y los de madera de ramas y follaje de árboles completos de tipo exponencial. Los coeficientes de determinación de los modelos a nivel árbol indican que existe una considerable variabilidad, principalmente, en las biomásas de ramas, lo que puede ser consecuencia del proceso de declinación en la zona de estudio. La biomasa total de los árboles se distribuye en forma atípica entre los compartimentos aéreos: 97 % en los fustes, 3 % en madera de ramas y 0.07 % en follaje. Este patrón de distribución de biomasa refleja el efecto del deterioro de los bosques de *A. religiosa*.

**Palabras clave:** Fuste, rama, acículas, ecuación alométrica, oyamel, productividad primaria neta.

### ABSTRACT

At present, the federal government promotes a payment for carbon sequestration by forests to mitigate global change. This is why there exists a need for estimating biomass and carbon sequestration rates in *Abies religiosa* forests. In this study stem, branch wood and needle biomass estimation models were generated for whole *A. religiosa* trees and branches in stands at Cerro Tláloc, Texcoco, Estado de México. For whole trees biomass was a function of breast height diameter (BHD), and for individual branches, biomass was a function of basal diameter (BD). Use of tree-level models is suitable for trees with BHD within the range of 12 and 105 cm, and branch-level models are recommended for BD within 1 and 120 mm. Stem models were potential while tree-level branch wood and foliage ones were exponential. Determination coefficients for whole-tree models show that there exists a large variability, especially for branch biomass, which is likely to be a result of the decline process taking place in the study area. Total tree biomass is atypically distributed within aboveground tree components: 97 % corresponds to stems, 3 % to branch-wood and 0.07 % to foliage. This biomass distribution pattern may be a reflection of the decline process affecting *A. religiosa* in the study area.

**Key words:** Stem, branch, needle, allometric equation, Sacred-fir, net primary productivity.

Fecha de recepción: 5 de febrero 2010

Fecha de aceptación: 25 de julio de 2011

---

<sup>1</sup> Posgrado Forestal, Colegio de Posgraduados. Correo-e: floresnp@colpos.mx

<sup>2</sup> Posgrado de Hidrociencias, Colegio de Posgraduados.

<sup>3</sup> Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

## INTRODUCCIÓN

La conversión de los bosques maduros en áreas abiertas para diferentes usos económicos del suelo, como agricultura o ganadería, es un fenómeno que se ha presentado a lo largo de los últimos siglos (Herrera *et al.*, 2001). Los bosques están dentro de los ecosistemas naturales con mayor producción primaria neta. Se calcula que producen de 400 a 1,000 g m<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> de carbono, cantidad dos veces superior a la de los pastizales y varias veces mayor que la de los océanos (Waring y Schlesinger, 1985). Una parte de esta producción se acumula como biomasa y humus, que constituyen la producción primaria neta. La otra parte se destina a procesos de mantenimiento del ecosistema, a través de la respiración (Escandón *et al.*, 1999).

Garzuglia y Saket (2003) definen la biomasa aérea como la cantidad total de materia orgánica aérea presente en los árboles, e incluyen hojas, ramas, tronco principal y corteza. Para la estimación de biomasa, el procedimiento más común consiste en el muestreo destructivo de unos cuantos árboles para después modelar el contenido de biomasa en función de variables fáciles de medir, para ello se utilizan métodos de regresión (Díaz *et al.*, 2007).

La biomasa se ha convertido en un elemento importante en los estudios sobre los cambios que ocurren a escala mundial, dado el posible efecto atenuador (sumidero de carbono) que los bosques pueden tener al secuestrar los excedentes de los gases de efecto invernadero, de un modo temporal (biomasa) y permanente (suelo) y a las consecuencias que se derivan de la modificación de las condiciones climáticas sobre la salud, estructura y biodiversidad de un sistema forestal (Vidal *et al.*, 2004).

Las ecuaciones de biomasa permiten estimar, con bastante exactitud, el peso de las especies forestales a partir de un número reducido de parámetros de los árboles en pie (López y Keyes, 1987; Castellanos *et al.*, 1996; Rojo *et al.*, 2005). Sin embargo, la disponibilidad de modelos para coníferas como *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. es reducida. En México se han desarrollado ecuaciones para *Pinus montezumae* Lamb. (Garcidueñas, 1987; Manzano *et al.*, 2007; López-López *et al.*, 2009), *Pinus cembroides* Zucc. (López y Keyes, 1987), *Pinus patula* Schltdl. et Cham. (Castellanos *et al.*, 1996), *Alnus glabrata* Fernald, *Clethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* (Schltdl.) Lundell, *Quercus peduncularis* Née, *Liquidambar macrophylla* Oerst e *Inga* sp. (Acosta *et al.*, 2002), *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. (Rojo *et al.*, 2005) y para *Abies religiosa* (Avendaño *et al.*, 2009).

Los modelos para el cálculo de la biomasa de árboles están influenciados por los cambios en la estructura, como consecuencia del manejo, presencia de plagas y enfermedades, condiciones climáticas, de suelo o incluso factores genéticos.

## INTRODUCTION

The conversion of old forests into open areas for different economic land use such as agriculture or livestock farming has occurred during the last centuries (Herrera *et al.*, 2001). Forests are one of the natural ecosystems with highest net primary production. It has been calculated that they produce from 400 to 1,000 g m<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup> C, which is an amount twice higher than grasslands and several more than that of oceans (Waring and Schlesinger, 1985). One part of production accumulates as biomass and humus, which constitute the net primary production. The other part is bound to maintenance process of the ecosystem, through respiration (Escandón *et al.*, 1999).

Garzuglia and Saket (2003) define aerial biomass as the total amount of aerial organic matter in trees, including leaves, branches main stem and bark. The most regular procedure for biomass estimation is destructive sampling of some trees for a later modeling of biomass content in terms of easily measurable variables, in which regression methods are used (Díaz *et al.*, 2007).

Biomass has become an important element in studies about changes that occur world-wide, from the possible mitigating effect (carbon sink) of forests when they perform the sequestration of the exceeding greenhouse- effect gases, in a temporary (biomass) or permanent (soil) way and to the consequences of the changing climate conditions upon health, structure and biodiversity of a forest system (Vidal *et al.*, 2004).

Biomass equations allow a rather accurate estimation of the weight of forest species from a small number of standing-tree parameters (López and Keyes, 1987; Castellanos *et al.*, 1996; Rojo *et al.*, 2005). However, the availability of models for softwoods such as *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. is rather small. Some equations have been developed in Mexico for *Pinus montezumae* Lamb. (Garcidueñas, 1987; Manzano *et al.*, 2007; López-López *et al.*, 2009), *Pinus cembroides* Zucc. (López y Keyes, 1987), *Pinus patula* Schltdl. et Cham. (Castellanos *et al.*, 1996), *Alnus glabrata* Fernald, *Clethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* (Schltdl.) Lundell, *Quercus peduncularis* Née, *Liquidambar macrophylla* Oerst e *Inga* sp. (Acosta *et al.*, 2002), *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. (Rojo *et al.*, 2005), as well as for *Abies religiosa* (Avendaño *et al.*, 2009).

Models for tree biomass are influenced by changes in structure, as a consequence of management, plagues and diseases, climate, soil and even some genetic factors.

Forest decline is defined as a multifactor sickness caused by biotic and abiotic agents that generates a decrease of vigor and survival of trees (Granados *et al.*, 2001 and Vázquez *et al.*, 2004). Ciesla (1989) and Granados *et al.* (2001) point out that there are symptoms related to this phenomenon, among

La declinación forestal se define como una enfermedad multifactorial causada tanto por agentes abióticos como bióticos, lo que implica la reducción del vigor y supervivencia de los árboles (Granados *et al.*, 2001 y Vázquez *et al.*, 2004). Ciesla (1989) y Granados *et al.* (2001) y López *et al.* (2006) señalan que son varios los síntomas relacionados con dicho fenómeno, tales como la reducción del crecimiento, degeneración de los sistemas radicales, clorosis en el follaje, reducción de las reservas fotosintéticas, mortalidad de brotes y ramas e incremento de la incidencia de ataques de insectos, que se presentan de manera secuencial o simultánea. Alvarado *et al.* (1993) citan que puede alterarse la forma cónica de la copa y generarse defoliación severa y muerte de ramas en las partes bajas del árbol. Al momento de modelar las variables de los árboles o ecosistemas sujetos a este proceso de declinación, se espera que todos los síntomas mencionados tengan un efecto directo en los parámetros de los modelos generados.

El objetivo de este estudio fue aportar nuevos modelos para la estimación de biomasa de los componentes aéreos de *A. religiosa* en bosques afectados por el proceso de declinación, como es el caso de algunos bosques cercanos al Valle de México. Se pretende que las ecuaciones sirvan como herramienta para la realización de estudios de productividad primaria neta, captura de carbono y de distribución de biomasa en bosques que se encuentren en dicha condición.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El presente trabajo se llevó a cabo en el Cerro Tláloc, en la región fisiográfica conocida como Sierra Nevada, que se ubica al oriente del Estado de México (Figura 1). La elevación del cerro es de 4,120 m y el área de estudio se localiza en la vertiente occidental del mismo, en donde la especie dominante es *A. religiosa*.

Clima.- A lo largo del declive occidental del Cerro Tláloc se distinguen tres subtipos climáticos: en las áreas planas más cercanas a los lomeríos el clima es  $C(w_0)(w)b(i')$ ; templado subhúmedo con una precipitación media anual de 700 mm, con régimen de lluvia en verano, temperatura media anual entre 12 y 18 °C y con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. En la zona de lomeríos, hacia las estribaciones de la Sierra de Río Frío el clima es  $C(w_1)(w)b(i')$ ; templado subhúmedo, con una precipitación media anual entre 800 y 900 mm, régimen de lluvias en verano, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C y con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. En las laderas montañosas el clima es de tipo  $C(w_2)(w)b(i')$ ; templado subhúmedo, con una precipitación media anual entre 900 y 1,200 mm, régimen de lluvias en verano, temperatura media anual de 10 y 14 °C, con una oscilación térmica de 5 a 7 °C. Las fluctuaciones climáticas se deben a la orografía (Ortíz y Cuanalo, 1977).

which are a reduction in growth, degeneration of the root system, foliage chlorosis, diminishment of photosynthetic reserves, shoot and branch mortality and an increment of insect attack, all of which could act sequentially or simultaneously. Alvarado *et al.* (1993) stated that the conic shape of the crown can change and generate an intensive defoliation and death of the lower branches. At the time of modeling the tree variables or ecosystems subjected to decline, it is expected that all the aforementioned symptoms have a direct effect on the parameter of the generated models.

The aim of this study was to provide new models for biomass estimation of the aerial components of *A. religiosa* in forests in decline, as some nearby Valle de Mexico are. It is expected that these equations might be useful to accomplish net primary productivity, carbon sequestration and of biomass distribution studies in forests that are in this condition.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The study here described was carried out in Cerro Tláloc (Tlaloc Hill), in Sierra Nevada that lies at the East of Estado de México (Figure 1). The highest altitude is 4,120 m and the study area is located in the western hillside, where *A. religiosa* is the dominant species.

Climate.- Along the western fall of Cerro Tlaloc, three climate subtypes can be found: in the closest plains to the hills, the type of weather is  $C(w_0)(w)b(i')$ , which is a subhumid temperate climate with 700 mm of annual mean precipitation, summer rainfall, annual average temperature between 12 and 18 °C and a thermic oscilation from 5 to 7 °C. In the hill zone, nearby Río Frío Mountain Range, the weather is  $C(w_1)(w)b(i')$  which is a subhumid temperate climate with 800-900 mm of annual mean precipitation, summer rainfall, annual average temperature between 12 and 18 °C and a thermic oscilation from 5 to 7 °C. In the hillsides, the weather is of the  $C(w_2)(w)b(i')$  type, which is a subhumid temperate climate with 900 and 1200 mm of annual mean precipitation, summer rainfall, annual average temperature between 10 and 18 °C and a thermic oscilation from 5 to 7 °C. Climatic fluctuations are due to orography (Ortíz and Cuanalo, 1977).

Soils.- According to Mooser (1975), the edaphic material of Valle de México was the result of the volcanic activity of the Tertiary and Quaternary periods. The formations of the middle Tertiary (Oligocene and Miocene) are located from Tláloc up to near San Pablo Ixayoc town. Soils are incipient, of coarse texture near the cineritic cone of Tláloc, and in the resting areas, they are black, deep, of medium texture and rich in organic matter and with medium texture (migajones o francos).

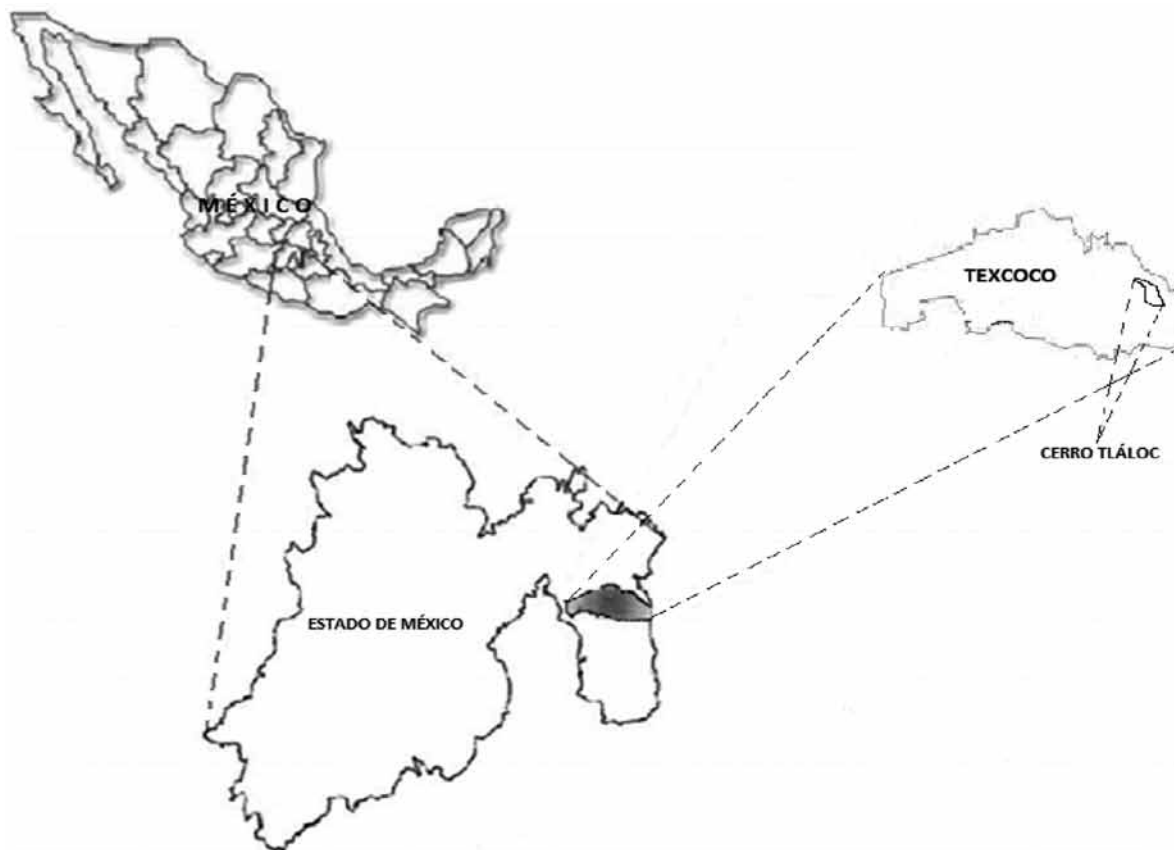


Figura 1. Localización del área de estudio. Cerro Tlaloc, Texcoco, Estado de México.  
Figure 1. Location of the study area (Cerro Tlaloc, Texcoco, Estado de Mexico State).

Suelos.- De acuerdo con Mooser (1975) el material edáfico que constituye el Valle de México fue producto de erupciones ocurridas en el terciario y cuaternario. Las formaciones del terciario medio (oligoceno-mioceno) se localizan desde el Tlaloc hasta cerca del poblado de San Pablo Ixáyoc. Los suelos son incipientes, de textura gruesa en las proximidades del cono cinerítico del Tlaloc y en las áreas restantes son negros, profundos, muy ricos en materia orgánica y de textura media (migajones o francos).

Vegetación.- En la zona alta de la montaña se desarrolla el bosque y el pastizal de altura. En la parte más alta de esta zona se tiene bosque de *Pinus hartwegii* Lindl., *Garrya laurifolia* Benth. y *Juniperus monticola* Martínez. Más abajo, se observa el bosque de *Abies religiosa* y *Quercus* spp. (Palma, 1996). En la zona media de lomeríos se desarrolla bosque de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham., *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus rudis* Endl. y *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. En sitios húmedos la vegetación está constituida por *Alnus jorullensis* Benth., *Salix bonplandiana* Kunth, *Fraxinus udhei* (Wenz.) Lingelsh., *Buddleia cordata* Kunth, *Prunus serotina* Ehrh., *Taxodium mucronatum* Ten. y *Senecio salignus* DC.

Vegetation.- In the mountain zone forest and highland grasslands grow. In the highest part of the zone, there is a forest of *Pinus hartwegii* Lindl., *Garrya laurifolia* Benth. and *Juniperus monticola* Martínez. In a lower area *Abies religiosa* and *Quercus* spp. forests are found (Palma, 1996). In the middle of hills *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham., *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus rudis* Endl. and *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl. forests grow. In humid places, vegetation is made-up by *Alnus jorullensis* Benth., *Salix bonplandiana* Kunth, *Fraxinus udhei* (Wenz.) Lingelsh., *Buddleia cordata* Kunth, *Prunus serotina* Ehrh., *Taxodium mucronatum* Ten. and *Senecio salignus* DC.

#### Models for total tree biomass

In order to generate the total tree biomass models 10 individuals of different size were selected, that included the greatest diameter variability in the zone (12 to 105 cm). Normal diameter was measured to the selected trees with a diametric tape.

Afterwards, total heights were measured with a 50 m longimeter branches were removed and the stem was divided into logs of commercial size (2.55 m de long) by using a Truper

## Modelos para biomasa de árboles completos

Para generar los modelos de biomasa de árboles completos se seleccionaron 10 individuos de diferentes dimensiones, que incluyeron la mayor variabilidad de diámetros presentes en la zona (12 a 105 cm). A los árboles ejemplares, se les midió el diámetro normal (DN) con una cinta diamétrica y posteriormente fueron derribados.

En seguida se le determinó su altura total con un longímetro de 50 m, se desramó y el fuste fue seccionado en trozas de dimensiones comerciales (2.55 m de longitud), con una usando una motosierra marca Truper con espada de 20". Durante el troceo del fuste se obtuvo una rodaja de aproximadamente cinco centímetros de espesor como muestra de cada troza. A cada troza se le midieron los diámetros inferior y superior con una cinta diamétrica marca Forestry Suppliers Metric Fabric Diameter Tape, modelo 283D/160 cm, con el objeto de estimar su volumen. El diámetro de la base de cada una de las ramas del árbol se midió con un vernier digital marca Mitutoyo.

En campo se obtuvo el peso húmedo de cada una de las trozas (cuando fue posible), mediante una báscula marca Ohaus de 100 kg de capacidad y 50 g de precisión. Cuando estas pesaban más de 100 kg en húmedo, solo se determinó su volumen con la fórmula de Smalian:

$$V = (B + b) / 2 * L$$

Donde:

- V = Volumen de la troza (m<sup>3</sup>)
- B, b = Área de la sección mayor y menor de la troza (m<sup>2</sup>)
- L = Longitud de la troza (m)

Las rodajas del fuste se trasladaron en bolsas de polietileno al laboratorio del Postgrado Forestal del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, para secarlas a 80 °C, hasta alcanzar peso constante en un horno de circulación forzada marca Felisa modelo F20. Posteriormente se determinó la relación entre el peso seco y peso húmedo. Esta proporción se aplicó al peso húmedo total de las trozas previamente pesadas en campo, para determinar su biomasa.

Cuando las trozas pesaron más de 100 kg, el cálculo de su biomasa se realizó de manera indirecta, a partir de la estimación de la densidad de la madera. Las rodajas extraídas de cada troza se utilizaron para calcular la densidad de la madera de la troza correspondiente.

En el laboratorio, las rodajas (o muestras de ellas en el caso de rodajas muy grandes) se impermeabilizaron con parafina para obtener su volumen mediante el principio de Arquímedes. Para ello se usaron recipientes con agua de tamaño adecuado

power saw with a 20" blade. During these operations, a 5 cm thick slice from each log was taken as a sample. To each log were measured the lower and upper diameters with a diametric tape, in order to estimate its volume. The diameter of the base of each one of the branches was measured with a Mitutoyo digital vernier.

In the field was obtained the fresh weight of each log (when it was possible), with an Ohaus 100 kg scale and 50 g precision. When their wet weight was over 100 kg, volume was only determined with the Smalian formula:

$$V = (B + b) / 2 * L$$

Where:

- V = Volume of the long (m<sup>3</sup>)
- B, b = Area of the greatest and smallest section of the log (m<sup>2</sup>)
- L = Length of the log (m)

Stem slices were kept into plastic bags and were taken to the Forest Graduate Studies Laboratory at Montecillo Campus that belongs to the Graduate Studies School (Colegio de Postgraduados), where they were dried at 80 °C, until they reached a constant weight in a forced- circulation kiln marca y modelo. Y por cuánto tiempo Afterwards, the dry weight/wet weight relation was determined. This ratio was applied to the total wet weight of the logs previously weighted at the field, in order to determine biomass.

When logs were weighed more than 100 kg, the determination of biomass was carried out in an indirect way, from the estimation of wood density. The slices taken from each log were used to calculate the wood density of the corresponding log.

In the laboratory, the slices (or samples of them when slices were too big) were waterproofed with paraffin in order to get their volume by the Archimedes principle. For that ending, containers with water of a right size for the sample volume, which were placed on the 100 kg Ohaus scale of 50 g precision, when big samples are involved. When samples were small, a 2 kg Ohaus and precision of tenth of gram was used. Once the volume is had, weight was determined in order to estimate their density by the following formula:

$$\delta m = m/v$$

Where:

- $\delta m$  = Density of wet wood (kg m<sup>-3</sup>)
- m = Mass (kg)
- v = Volume (m<sup>3</sup>)

para el volumen de las muestras, se colocaron sobre una báscula Ohaus de 100 kg de capacidad y 50 g de precisión, en el caso de muestras grandes. En el caso de las muestras pequeñas se utilizó una balanza Ohaus de dos kilogramos de capacidad y un décimo de gramo de precisión. Una vez que se obtuvo el volumen se procedió a determinar su peso, para estimar su densidad mediante la fórmula:

$$\delta m = m/v$$

Donde:

$\delta m$  = Densidad de la madera en húmedo (kg m<sup>-3</sup>)  
 m = Masa (kg)  
 v = Volumen (m<sup>3</sup>)

La biomasa de cada muestra o rodaja se determinó colocando las muestras en un horno de secado de circulación forzada marca Felisa modelo F20 a 80 °C, para eliminar la parafina. Una vez conocidos la densidad de las rodajas y el volumen de las trozas correspondientes, se calculó la biomasa de las trozas mediante la fórmula:

$$Bt = \delta t * vt$$

Donde:

Bt = Biomasa de troza (kg)  
 $\delta t$  = Densidad (kg m<sup>-3</sup>)  
 vt = Volumen de la troza (m<sup>3</sup>)

Con los datos de biomasa de fustes se corrió un procedimiento de regresión, para generar un modelo de estimación de biomasa de ese compartimento en función del diámetro normal.

$$Bf = f (DN)$$

Donde:

Bf = Biomasa de fuste (kg)  
 DN = Diámetro normal (cm)

La biomasa de madera de ramas y del follaje se estimó a partir del diámetro basal de la rama, para lo cual se utilizaron modelos previamente elaborados por el procedimiento que se describe a continuación.

### Modelos para biomasa a nivel de ramas

El modelo para estimar la biomasa de madera de ramas individuales se elaboró a partir de 35 ramas de diversos diámetros basales (1 a 120 mm), procedentes de varios árboles del área de estudio. A las ramas recolectadas se les determinó

The biomass of every sample or slice was determined by placing the samples into a marca y modelo drying forced-circulation kiln at 80 °C in order to remove the paraffin. Once the slice density and the volume of their logs were known, the biomass of the logs was calculated by the following formula:

$$Bt = \delta t * vt$$

Where:

Bt = Log biomass (kg)  
 $\delta t$  = Density (kg m<sup>-3</sup>)  
 vt = Volume of the log (m<sup>3</sup>)

With the stem biomass data a regression was run to generate a biomass estimation model of that compartment in terms of the normal diameter:

$$Bf = f (DN)$$

Where:

Bf = Stem biomass (kg)  
 DN = Normal diameter (cm)

Branch wood and foliage biomass was estimated from the basal branch diameter; thus, previously made models were used by the procedure was described as follows.

### Models for biomass at a branch level

The model to estimate wood biomass of individual branches was designed from 35 branches of different basal diameters (1 to 120 mm), taken from several trees of the study area. To the collected branches, basal diameter was calculated with a Mitutoyo digital vernier caliper, and from them, leaves were pulled apart in the field, and were weighted by a Ohaus ES100L scale in wet, wood and foliage separately. When branches surpassed the capacity of the Felisa F20 drying kiln, slices of wood were taken and several representative samples, 10 at the most, were weighted in wet. This material was taken to the laboratory to be dried at a Felisa F20 forced-circulation kiln at 80 y 70 °C, respectively, in order to determine its moisture content by the following equation:

$$CHm = (PHm - PSm) * 100 / PHm$$

Where:

CHm =Moisture content of the sample or slice (%)  
 PHm = Wet weight of the sample (g)  
 PSm = Dry weight of the sample (g)

su diámetro basal con un vernier digital marca Mitutoyo y posteriormente fueron deshojadas en campo y se pesaron en húmedo la madera y el follaje por separado, en una balanza Ohaus ES100L. De la madera, cuando las ramas superaron la capacidad del horno de secado marca Felisa F20, se tomaron rodajas, y del follaje se obtuvo un máximo de 10 muestras representativas que también fueron pesadas en húmedo. El material se llevó al laboratorio para su secado en un horno de circulación forzada marca Felisa F20 a 80 y 70 °C, respectivamente, para determinar su contenido de humedad mediante la ecuación:

$$CHm = ((PHm - PSm) * 100) / PHm$$

Donde:

CHm = Contenido de humedad de la muestra o rodaja (%)

PHm = Peso húmedo de la muestra (g)

PSm = Peso seco de la muestra (g)

El contenido de humedad se aplicó al total de madera de las ramas y follaje para obtener su peso seco, a partir de su peso húmedo.

$$Bcr = PHcr - (PHcr * CHcr / 100)$$

Donde:

Bcr = Biomasa del compartimiento de la rama (madera o follaje, kg)

PHcr = Peso húmedo del compartimiento de la rama (madera o follaje, kg)

CHcr = Contenido de humedad del compartimiento de la rama (madera o follaje, %)

Mediante el uso de la regresión no lineal se procedió a generar los modelos para estimar la biomasa de madera de ramas y la de follaje, las cuales fueron las variables dependientes estimadas, en función del diámetro basal de la rama.

$$Bmr = f(Dbr)$$

$$Bfr = f(Dbr)$$

Donde:

Bmr = biomasa de madera de ramas individuales (kg)

Bfr = biomasa de acículas de ramas (kg)

Dbr = diámetro basal de rama (mm)

Moisture content was applied to the total branch wood and foliage to get their dry weight from their wet weight.

$$Bcr = PHcr - (PHcr * CHcr / 100)$$

Where:

Bcr = Biomass of compartment of the branch (wood or foliage, kg)

PHcr = Wet weight of the branch compartment (wood or foliage, kg)

CHcr = Moisture content of the branch compartment (wood or foliage, %)

By non-linear regression, a model was designed to estimate branch wood and foliage biomass, which were dependent estimated variables, in terms of the basal diameter of the branch.

$$Bmr = f(Dbr)$$

$$Bfr = f(Dbr)$$

Where:

Bmr = Single branch wood biomass (kg)

Bfr = Branch needle biomass (kg)

Dbr = Basal diameter of the branch (mm)

## RESULTS AND DISCUSION

Figures 2 and 3 show the models to estimate wood biomass of single branches (Bmr) and of branch needles (Bfr) of *Abies religiosa*. Biomass prediction is according to the basal diameter of branches (Dbr). Models are recommended for branches of 1 to 120 mm in diameter.

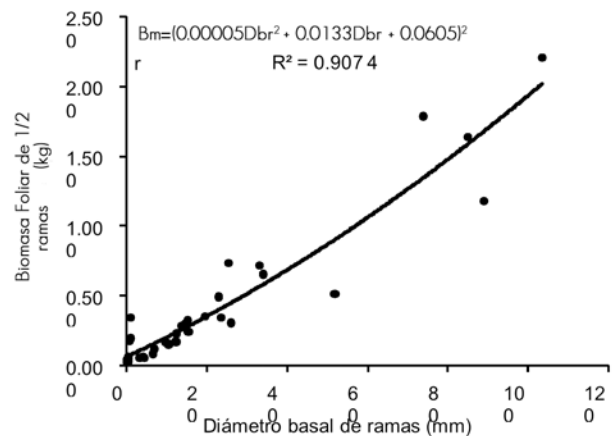


Figura 2. Modelo de estimación de biomasa de madera de ramas individuales de *Abies religiosa*

Figure 2. Model to estimate wood biomass of *Abies religiosa* single branches.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 2 y 3 muestran los modelos para estimar biomasa de madera de ramas individuales (Bmr) y de acículas de ramas (Bfr) de *Abies religiosa*, respectivamente. La predicción de biomasa está en función del diámetro basal de las ramas (Dbr). Los modelos se recomiendan para ramas con diámetros de 1 a 120 mm.

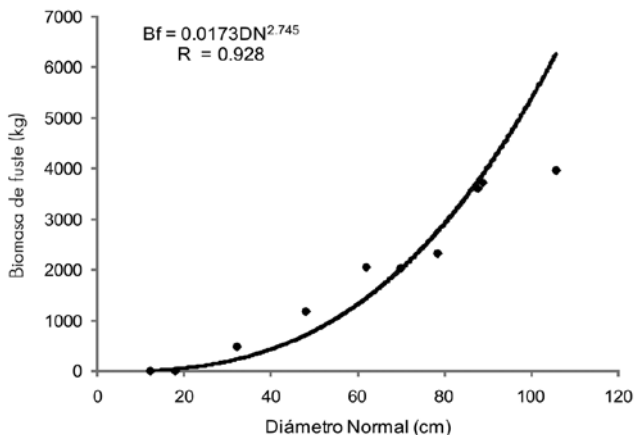


Figura 3. Modelo de estimación de biomasa foliar de ramas individuales de *Abies religiosa*.

Figura 3. Model to estimate foliage biomass of *Abies religiosa* single branches.

El modelo de madera de ramas tuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.9074 (Figura 2), y para el caso follaje de ramas de 0.8363 (Figura 3). Estos valores de  $R^2$  son bajos comparados con los registrados por Castellanos *et al.* (1996) en un estudio con *Pinus patula* Schltdl. *et* Cham (0.96 y 0.92 para madera de ramas y follaje de ramas, respectivamente) y también son inferiores comparados con los consignados por Garcidueñas *et al.* (1987) para el *Pinus montezumae* Lamb. (0.9663 y 0.8557 para madera de ramas y follaje de ramas, respectivamente). Vidal *et al.* (2004) citan una  $R^2$  para biomasa foliar de 0.9055 y para biomasa de madera de ramas de 0.8954 en *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret *et* Golfari, valores similares a los determinados en el presente estudio. Es probable que los coeficientes ( $R^2$ ) relativamente bajos que se obtuvieron para *A. religiosa* son consecuencia de los altos niveles de mortalidad de ramillas y follaje, relacionados con el proceso de declinación de la especie en la zona.

En la construcción de los modelos se tomaron ramas con grados de declinación muy variables, lo que pudo contribuir al aumento de la variabilidad y a la disminución de los coeficientes de determinación. La presencia de declinación en la zona afecta a todo el árbol; sin embargo, parte del follaje se desprende y las ramas quedan con pocas hojas. Este

The branch wood model had a determination coefficient ( $R^2$ ) of 0.9074 (Figure 2), and of 0.8363 for branch foliage of (Figure 3). These  $R^2$  values are low compared to those reported by Castellanos *et al.* (1996) when they studied *Pinus patula* Schltdl. *et* Cham (0.96 for branch wood and 0.92 for branch foliage) as well as to the results of Garcidueñas *et al.* (1987) for *Pinus montezumae* (0.9663 for branch wood and 0.8557 for branch foliage). Vidal *et al.* (2004) reported a  $R^2$  of 0.9055 for foliar biomass and of 0.8954 for branch wood biomass in *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret *et* Golfari, which are closer to the numbers found in this study. Probably the rather low  $R^2$  for *A. religiosa* are a consequence of the high foliage and branch mortality, which is related to decline.

In constructing the models were considered branches with different decline levels, which could explain the increment of variation and the decrease of the determination coefficients. The decline in the area affects the whole tree; however, part of the foliage falls and the branches hold a few leaves. This fact could explain the lower determination coefficient of the model to estimate foliage biomass.

Figures 4, 5 and 6 show the models to estimate stem, branch wood and foliage biomass of total *Abies religiosa* trees. Biomass prediction was according to DN. The stem biomass data were fitted to the potential model:

$$Bf = 0.0173DN^{2.7459}$$

Where:

Bf = Stem biomass (kg)  
DN = Normal diameter (cm)

The wood branch and foliage biomass models at tree level are exponential; that of branches:

$$Bmra = 1.5842e^{0.0044DN}$$

Where:

Bmra = Wood biomass of the group of tree branches (kg)  
DN = Normal diameter (cm)

The foliage biomass model at tree level:

$$Bfa = 0.8413e^{0.0398DN}$$

Where:

Bfa = Foliage biomass at tree level (kg)  
DN = Normal diameter (cm)



hecho explicaría el menor coeficiente de determinación del modelo para estimar la biomasa foliar.

Las figuras 4, 5 y 6 muestran los modelos para estimar biomasa de fuste, de madera de ramas y de follaje para árboles completos de *A. religiosa*. La predicción de biomasa estuvo en función del DN. Los datos de biomasa de fuste se ajustaron al modelo potencial:

$$Bf = 0.0173DN^{2.7459}$$

Donde:

*Bf* = Biomasa de fuste (kg)  
*DN* = Diámetro normal (cm)

Los modelos de biomasa de madera de ramas y follaje a nivel árbol son de tipo exponencial, el de ramas:

$$Bmra = 1.5842e^{0.0044DN}$$

Donde:

*Bmra* = Biomasa de madera del conjunto de ramas del árbol (kg)  
*DN* = Diámetro normal (cm)

El modelo de biomasa de follaje a nivel árbol:

$$Bfa = 0.8413e^{0.0398DN}$$

Donde:

*Bfa* = Biomasa de follaje a nivel árbol (kg)  
*DN* = Diámetro normal (cm)

Estas ecuaciones son recomendables para valores de DN en el intervalo de 12 a 106 cm y son confiables para usarse en condiciones similares, en cuanto al grado de declinación.

Los coeficientes de determinación para los modelos de estimación de biomasa a nivel árbol fueron 0.928, 0.6176 y 0.588 para fuste, madera de ramas y follaje, respectivamente. Aunque los valores de  $R^2$  son superiores a los registrados por algunos otros autores, hubiera sido deseable lograr valores más altos; sin embargo, los altos niveles de mortalidad a nivel fuste, ramas y follaje, estos a su vez causados por el proceso de declinación en la zona, posiblemente originaron estos resultados, especialmente en los casos de ramas y follaje (figuras 5 y 6).

Díaz (2007) en un estudio con *Pinus patula* consigna valores de  $R^2 = 0.9828$  para biomasa de fuste cuyo diámetro normal

These equations are advisable for DN values between 12 and 106 cm and are reliable to be used under similar conditions, in terms of decline.

The determination coefficients for the biomass estimation models were 0.928 for the stem, 0.6176 for branch wood and 0.588 for foliage. Even if the  $R^2$  values reported by several authors are higher, it would have been good to get higher numbers in this study; however, the high mortality levels at stem, branch and foliage level caused by decline in the area are the reasons why better results were not accomplished, specially in branch and foliage (figures 5 and 6).

In a *Pinus patula* study, Díaz (2007) reported  $R^2$  values of 0.9828 for stem biomass with a normal diameter interval from 6.7 to 64.1 cm. This number is higher than that found for *A. religiosa*; however, the range of sizes of the stem considered in this study might have helped to reduce the  $R^2$  value in the research.

For total *A. religiosa* trees, Avendaño *et al.* (2009) found  $R^2 = 0.99$ . Geron and Ruark (1988) estimated an  $R^2$  of 0.62 for *Pinus radiata* D. Don needle biomass. Navar *et al.* (2001) cite 0.83 for  $R^2$  of stem biomass, 0.66 for branch wood biomass and 0.38 for needle biomass of *Pinus durangensis* Ehren. and *Pinus cooperi* Blanco. The determination coefficients of these studies for the branch wood and needle biomass are low, in general, and are coincidental to those here documented. In the case of pines, the low determination coefficients for biomass models of branch wood and foliage can respond to the mortality of branches causes by self-pruning, from the intolerant feature of this taxonomic group; in regard to *A. religiosa*, a totally shadow-tolerant species, the scarce self-pruning does not explain the low determination coefficients. Thus, it is only attributable to branch mortality, as a result of decline to which this specie is subject in this study area and in other places of its natural distribution area (Alvarado-Rosales *et al.* 2002, López 1997, Hernández-*et al.* 2001).

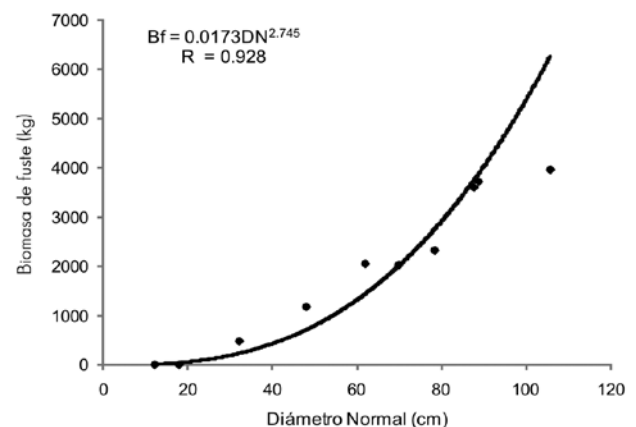


Figura 4. Modelo para la estimación de biomasa de fustes de *Abies religiosa*.

Figure 4. Biomass estimation model for *Abies religiosa* stems.

varió en un intervalo de 6.7 a 64.1 cm. Esta cifra es mayor a la determinada para *A. religiosa*; sin embargo, el intervalo de dimensiones de fuste cubierto en dicho estudio quizá también contribuyó a disminuir el valor de  $R^2$ .

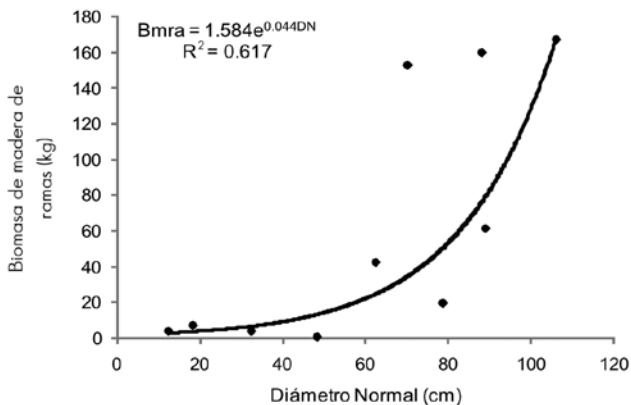


Figura 5. Modelo para la estimación de biomasa de madera del conjunto de ramas de árboles de *Abies religiosa*.  
 Figure 5. Biomass estimation model for *Abies religiosa* wood of the group of branches.

Para árboles completos de *A. religiosa*, Avendaño *et al.* (2009) obtuvieron una  $R^2 = 0.99$ . Geron y Ruark (1988) estimaron una  $R^2$  de 0.62 para biomasa de acículas en *Pinus radiata* D. Don. Navar *et al.* (2001), citan una  $R^2$  de 0.83 para biomasa de fuste, 0.66 para biomasa de madera de ramas y 0.38 para biomasa de acículas de *Pinus durangensis* Ehren. y *Pinus cooperi* Blanco. Los coeficientes de determinación encontrados en estos estudios para los casos de biomasa de madera de ramas y acículas son bajos, en general, coinciden con los aquí documentados. Para el caso de los pinos, los bajos coeficientes de determinación para modelos de biomasa de madera de ramas y follaje pueden responder a la mortalidad de ramas ocasionada por la autopoda, dado al carácter intolerante de este grupo taxonómico; en el caso de *A. religiosa*, especie tolerante a la sombra, la reducida autopoda no explica los bajos coeficientes de determinación. Por lo tanto solo es atribuible a la mortalidad de ramas, que resulta del fenómeno de declinación, al que actualmente está sujeta esta especie en la zona de estudio y en otros sitios del área de su distribución natural (Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002; López, 1997; Hernández *et al.*, 2001).

Distribución de biomasa en el árbol

La Figura 7 muestra la distribución de la biomasa en los componentes aéreos del árbol. En el fuste está la mayor parte de la biomasa (97%), mientras que en las ramas solo se acumula 3% de la biomasa y en el follaje 0.07%. Este patrón de distribución de biomasa es atípico de especies tolerantes a la sombra como lo es *A. religiosa*. En efecto, estas especies, por su tolerancia a la sombra, conservan, incluso ramas bajas, aún en condiciones de sombra, por lo que la expectativa es que

Biomass distribution in the tree

Figure 7 shows the biomass distribution of the aerial parts of the tree. In the stem is the greatest part of biomass (97%), while in branches is only stored 3% of biomass and 0.07% in foliage. This biomass distribution pattern is atypical of the shadow-tolerant species like *A. religiosa*. In fact, as these species are tolerant to shadow even in the lower branches, it is expected that they keep a larger proportion of biomass in these organs, compared to intolerant species.

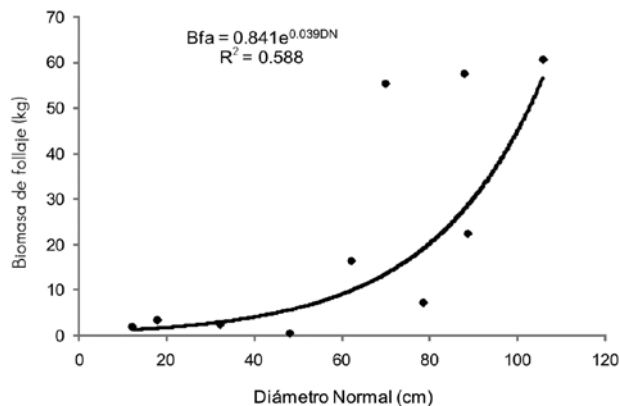


Figura 6. Modelo para la estimación de biomasa de acículas de árboles de *Abies religiosa*.  
 Figure 6. Biomass estimation model for *Abies religiosa* needles.

Navar *et al.* (2001) estimated that the stem of *Pinus durangensis* gathers 64 % and that of *Pinus cooperi* 67% of the total biomass of the tree, branch wood 22.5 and 22.4 %, and foliage 13.5 y 10.6%, respectively. In both species, biomass distribution is even more extreme, compared to that obtained for *A. religiosa*.

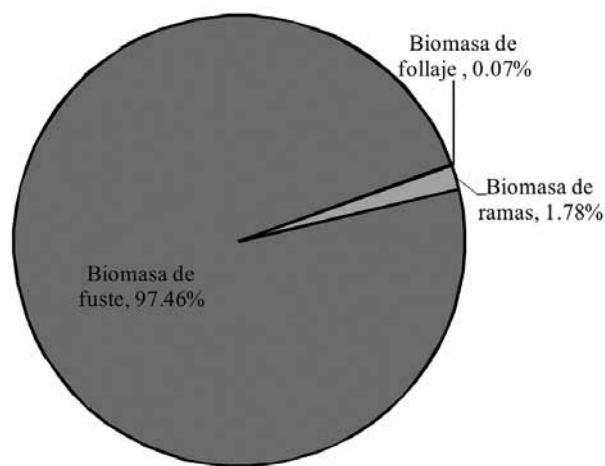


Figura 7. Distribución de biomasa en árboles de *Abies religiosa* del Cerro Tlálloc, Texcoco, Edo. de México.  
 Figure 7. Distribution of biomass of *Abies religiosa* trees of Tlaloc Hill, Texcoco, Edo. de México.

tengan una proporción más grande de biomasa en estos órganos, en comparación con las especies intolerantes.

Para *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi*, Navar *et al.* (2001) estimaron que el fuste contiene 64 y 67% de la biomasa total del árbol, la madera de ramas 22.5 y 22.4 % y el follaje 13.5 y 10.6%, respectivamente. En ambas especies, la distribución de biomasa es todavía más extrema, comparada con la que se obtuvo para *A. religiosa*.

No obstante, son congruentes con la apariencia actual del arbolado en el área de estudio. Avendaño *et al.* (2009), mencionan que en los árboles de oyamel 81.3 % de la biomasa se acumula en los fustes, 6.9% en ramas y 8.6 % en follaje. El valor de biomasa de ramas es similar al determinado en el presente estudio, pero la proporción de biomasa foliar es claramente menor. La diferencia en el patrón de distribución de biomasa, probablemente, resulta del efecto del fenómeno de declinación.

## CONCLUSIONES

Los modelos desarrollados en el presente estudio son aplicables a los árboles de *Abies religiosa* en proceso de declinación. La estructura de copa de los árboles de *A. religiosa* en dicha condición en el área de interés muestra señales de alteración. Esto aumenta la variabilidad de la biomasa de copas y dificulta su modelación.

El patrón de distribución de biomasa en los componentes aéreos de árboles de *A. religiosa* en el área de estudio es atípico, en comparación con individuos sin declinación, en respuesta a la alta mortalidad de follaje y ramas.

## AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada al primer autor para sus estudios de Maestría en Ciencias y por el financiamiento a través del proyecto 61559, 2006. A la Línea Prioritaria de Investigación 8 (LPI-8) del Colegio de Postgraduados, por el financiamiento parcial al estudio.

## REFERENCIAS

- Acosta M., M., J. J. Vargas H., A. Velázquez M. y J. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36: 725-736.
- Alvarado R., D., L. I. De Bauer and A. J. Galindo. 1993. Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environ. Pollut.* 80: 115-121.
- Alvarado-Rosales, D. and T. Hernández-Tejeda. 2002. Decline of Sacred-fir in the Desierto de los Leones National Park. In: Fenn, M. E., L. I. de Bauer, T. Hernández-T. (Eds.) *Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City air basin*. Springer. New York, NY, USA. pp. 243-260.
- Avendaño H., D., M. Acosta M., F. Carrillo A. y J. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia Mexicana*. 32 (3): 233-238.
- Castellanos F., J., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Agrociencia*. 30: 123-128.

Nevertheless, they are consistent with the present look of the trees in the study area. Avendaño *et al.* (2009) reported that in firs, 81.3 % of biomass is stored in the stem, 6.9% in branches and 8.6% in foliage. The branch biomass value is similar to that determined in the actual study, but the foliar biomass is clearly lower. The difference in the biomass distribution pattern, is probably, the result of the effect of decline.

## CONCLUSIONS

The models here presented are applicable to *Abies religiosa* in decline. The crown structure of the trees in the study area bear signs of distortion. This increases the variability of the biomass of crowns and makes modeling, difficult.

The biomass distribution pattern of the aerial parts of *A. religiosa* trees in the study area is atypical, compared to individuals without decline, as a reaction to the high mortality o foliage and branches.

## ACKNOWLEDGEMENTS

To CONACYT for the scholarship granted to the first author for his Master in Science studies and for the financial support provided to the 61559, 2006 project. To the Priority Research Line No. 8 (LPI-8) of the Graduate Studies School for having partially sponsored this study

*End of the English version*

- Giesla, W. M. 1989. Aerial photos for assessment on forest decline. A multinational overview. *Journal of Forestry*, 87 (2): 37-41.
- Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A. y J. Etchevers D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.
- Escandón C., J., J. B. H. J. de Jong., S. Ochoa O., I. March M. y M. A. Castillo. 1999. Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Junajab La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. *Boletín del Instituto de Geografía Núm.40*: 71-84.
- Garcidueñas M., A. R. 1987. Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México. México. 243 p.
- Geron C., D. and G. Ruark A. 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various trees in general. *Canadian Journal of Forestry Research*. 18(10): 1298-1304.
- Garzuglia, M. and M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. *Forest Resources Assessment WP 68*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy. 30 p.
- Granados S., D. y G. F. López R. 2001. Declinación forestal. *Revista Chapingo. Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(1): 5-13.
- Hernández T., T., R. M. Cox, J. Malcolm, M. L. de la Isla B., J. Vargas H., A. Velázquez M. y D. Alvarado R. 2001. Impacto del ozono sobre el polen de *Pinus hartwegii* Lindl. *Rev. Cien. For. en Mex.* 26: 5-18.
- Herrera A., M. A., I. del Valle J. y O. Alonso S. 2001. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. In: *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. 18 p.

- López L., M. A. 1997. Efectos del ambiente aéreo y del suelo sobre el desarrollo de síntomas de declinación de oyamel. *Terra* 15: 287-293.
- López-L., M. A., R. Reich M., C. Aguirre-Bravo. and A. Velázquez M. 2009. Pine growth and nutrient status as related to pine/alder ratio in mixed stands. *Journal of Biological Sciences*. 9(7): 637-647.
- López-López M. A., A. Velázquez M., J. Acosta M. y E. Estañol B. 2006. Biomass distribution in declining sacred-fir seedlings. *Interciencia* 31 (6): 451-455.
- López R., C. y R. Keyes. 1987. Modelos para estimación de biomasa de *Pinus cembroides* Zucc. In: *Memorias del II Simposio Nacional sobre Pinos Piñoneros*. México, D. F. México. pp: 211-220.
- Manzano M., D., M. A. López L., F. Manzano M. y E. Pineda H. 2007. Productividad primaria neta de una plantación de recuperación de suelos. In: *Memorias del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales*. Morelia, Mich., México. 11 p.
- Mooser, F. 1975. Historia geológica de la Cuenca de México. In: Departamento del Distrito Federal (Eds). *Memorias de las obras del sistema del drenaje profundo del Distrito Federal*. Tomo 1. Talleres Gráficos de la Nación. México, D. F. México. pp. 7-38.
- Navar, J., N. González y J. Graciano. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango. México. In: *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. pp. 1- 12.
- Ortiz S., C. y H. Cuanalo de la Cerda. 1977. Levantamiento fisiográfico del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, Edo. de Méx. México. 83 p.
- Palma T., A. 1996. Tipología del uso forestal de la tierra de la región norte de la Sierra Nevada y su cartografía. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Edo. de México. México. 103 p.
- Rojó M., G. E., J. Jasso M., J. J. Vargas H., D. J. Palma L. y A. Velázquez M. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 449-456.
- Vázquez S., L., J. Tamarit C. y J. Quintanar O. 2004. Caracterización de la declinación de bosques de encino en "Sierra de los Lobos" Guanajuato, México. *Polibotánica*. 17: 1-14.
- Vidal, A., J. Benítez Y., J. Rodríguez, R. Carlos. y H. Gra. 2004. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var *caribaea* en la E.F.I. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho. Revista de Ciencias Forestales* (11): 60-66.
- Waring E., H. and W. H. Schlesinger. 1985. *Forest ecosystems*. Academic Press. Orlando, FL. USA. 340 p.