

# ¿AFECTAN LOS ACLAREOS LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE *Pinus patula*?

## DOES THINNING AFFECT ABOVEGROUND BIOMASS ACUMMULATION IN A *Pinus patula* PLANTATION?

Gerardo Rodríguez-Ortiz<sup>1</sup>, Arnulfo Aldrete<sup>2\*</sup>, Víctor A. González-Hernández<sup>1</sup>, Héctor M. De Los Santos-Posadas<sup>2</sup>,  
Armando Gómez-Guerrero<sup>2</sup>, Aurelio M. Fierros-González<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Genética y <sup>2</sup>Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo,  
Estado de México. (aaldrere@colpos.mx)

### RESUMEN

El aclareo puede modificar la distribución y cantidad de biomasa aérea en función del tiempo de respuesta y de las condiciones de crecimiento. En este estudio se analizó el efecto de aclareos en la distribución y contenido de biomasa aérea acumulada de *Pinus patula* mediante muestreos destructivos de 30 árboles en 2009, después de estar sometidos a diferentes intensidades de aclareo desde el 2004, más un testigo intacto. La eliminación entre 40 y 69 % de la densidad inicial de plantación afectó significativamente ( $p \leq 0.05$ ) la cantidad y distribución de biomasa foliar y la cantidad de madera con corteza en el fuste a nivel de árbol individual (pero no por ha) en algunos componentes del árbol. Las intensidades altas de aclareo (65.3 y 68.7 %) y las respectivas densidades residuales bajas generaron la mayor acumulación de biomasa foliar (5.4 kg árbol<sup>-1</sup> y 8.0 t ha<sup>-1</sup>), que superaron ( $p \leq 0.05$ ) al testigo sin aclareo (1.5 kg árbol<sup>-1</sup>). En la biomasa de madera con corteza del fuste los árboles con aclareo también superaron ( $p \leq 0.05$ ) al testigo (98 vs. 35.3 kg árbol<sup>-1</sup>). Sin embargo, la acumulación de biomasa por unidad de superficie fue similar entre ambas condiciones, debido a la excesiva densidad residual del testigo; lo mismo ocurrió en la biomasa total de ramas y en la distribución en el fuste.

**Palabras clave:** componentes del árbol, fitomasa, plantación forestal, productividad primaria.

### INTRODUCCIÓN

Los modelos alométricos de biomasa para árboles individuales son típicamente específicos para las condiciones de sitio, manejo y especie.

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: noviembre, 2010. Aprobado: julio, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 719-732. 2011.

### ABSTRACT

Thinning may modify distribution and amount of aboveground biomass according to time of response and growth conditions. In this study, the effect of thinning on distribution and accumulated aboveground biomass content of *Pinus patula* was analyzed in 2009 through destructive samplings of 30 trees, after having been subjected to different thinning intensities since 2004, plus an intact control. Elimination between 40 and 69 % of initial plantation density significantly affected ( $p \leq 0.05$ ) quantity and distribution of leaf biomass and the amount of timber with bark on the stem at individual tree level in some tree components (but not by ha). The high thinning intensity (65.3 and 68.7 %) and respective low residual density generated the largest accumulation of foliar biomass (5.4 kg tree<sup>-1</sup> and 8.0 t ha<sup>-1</sup>), surpassing ( $p \leq 0.05$ ) the control without thinning (1.5 kg tree<sup>-1</sup>). In timber biomass with stem bark, trees with thinning also surpassed ( $p \leq 0.05$ ) the control (98 vs. 35.3 kg tree<sup>-1</sup>). However, biomass accumulation per unit was similar between both conditions, due to excessive residual density of the control; the same occurred in total branch biomass and in distribution on the stem.

**Key words:** tree components, phytomass, forest plantation, net primary productivity.

### INTRODUCTION

The allometric models of biomass for individual trees are typically specific for site conditions, management, and species. Often, the estimate of aboveground biomass components allows increasing their predictive utility at including crown variables (area and length of crown) and height, in addition to the normal diameter (Antonio *et al.*, 2007). The significant relations between crown and

A menudo la estimación de los componentes de biomasa aérea permite aumentar su utilidad predictiva al incluir variables de copa (área y longitud de copa) y la altura, en adición al diámetro normal (Antonio *et al.*, 2007). Las relaciones significativas entre la copa y la biomasa aérea con el diámetro normal (DN), edad y densidad son útiles en el manejo del bosque. La cantidad de biomasa que un árbol puede acumular y distribuir entre sus estructuras depende de varios factores. Según Peri *et al.* (2010), la edad y clase de copa en *Nothofagus antarctica* afectan la partición y el tiempo de máxima acumulación de biomasa, ya que con la edad presentan un gradiente de aumento y reducción en duramen y raíces finas. Aplicaciones de ácido salicílico en plántulas de *Pinus patula* aumentaron la acumulación de biomasa como consecuencia del aumento en DN y altura (San-Miguel *et al.*, 2003). La forma de la copa y diámetro del tallo tienden a variar con la altura, lo cual genera variaciones en la biomasa que están estrechamente correlacionadas con el DN ( $r > 0.91$ ) y la edad ( $r > 0.81$ ) (Alves and Santos, 2002; Pérez and Kanninen, 2003).

El aclareo es la principal herramienta mediante la cual se controla la densidad del rodal y se modifican los patrones de partición de biomasa. El efecto más evidente es el incremento de diámetro, sobre todo cuando se cortan árboles dominantes (Leak, 2007). Lo mismo observó Youngblood (2010) en bosques secos de coníferas, donde el aclareo aumentó el diámetro medio y originó un cambio significativo en la variación del diámetro del rodal. Así, el aclareo aplicado a árboles de diámetro pequeño permite obtener mayor volumen de madera comercial, que cuando se aplica a árboles de diámetro medio y grande. Los sitios no intervenidos pueden mostrar tasas mayores de crecimiento en biomasa que los aclareos realizados en árboles de diámetro medio y pequeño, ya que en espacios de crecimiento plenamente ocupados la reducción en número de individuos implicará un aumento en volumen de los árboles; sin embargo, el volumen por unidad de superficie se mantendrá sin cambios (Reineke, 1933; Yoda *et al.*, 1963; Hoover and Stout, 2007). Hubo efectos del aclareo al aplicar altas intensidades de corta a rodales viejos de *Picea abies* en Finlandia, pues la tasa de crecimiento en DN aumentó entre 31 y 34 % con respecto a las intensidades bajas (Jaakkola *et al.*, 2005). Aclareos intensivos (espaciamiento residual de 2.13×2.13 m) en *Pinus banksiana* causaron aumentos de amplitud de copa, diámetro de ramas, ahusamiento y altura (13.1 %),

aboveground biomass with normal diameter (DN), age, and density are useful in forest management. The amount of biomass a tree can accumulate and distribute among its structures depends on various factors. According to Peri *et al.* (2010), age and class of crown in *Nothofagus antarctica* affect partitioning and maximum accumulation time of biomass, since with age, they present a gradient of increment and reduction in heartwood and fine roots. Applications of salicylic acid in *Pinus patula* seedlings increased biomass accumulation as a consequence of DN and height increment (San-Miguel *et al.*, 2003). Crown shape and stem diameter tend to vary with height that generates variations in biomass, being closely correlated to DN ( $r > 0.91$ ) and age ( $r > 0.81$ ) (Alves and Santos, 2002; Pérez and Kanninen, 2003).

Thinning is the principal tool for controlling stand density and modifying patterns of biomass partitioning. The most obvious effect is the increment of diameter, especially when dominant trees are removed (Leak, 2007). Youngblood (2010) observed just the same in dry conifer forests, where thinning increased the mean diameter and significantly changed the diameter variation of the stand. Thus, thinning applied to trees of small diameter allows obtaining greater volume of commercial timber, than when applied to trees with medium and large diameter. Non managed sites may show higher growth rates in biomass than thinning carried out in trees of medium and small diameter, since in fully occupied growth spaces, the reduction in number of individuals will imply increase in tree volume; however, the volume per unit area will be maintained without changes (Reineke, 1933; Yoda *et al.*, 1963; Hoover and Stout, 2007). There were thinning effects at applying high cutting intensity to old *Picea abies* stands in Finland, as the DN growth rate increased between 31 and 34 % with respect to lower intensities (Jaakkola *et al.*, 2005). Intensive thinning (residual spacing of 2.13×2.13 m) in *Pinus banksiana* caused increase in crown and branch diameter, tapering, and height (13.1 %), DN (20 %), and commercial volume of the stem (75 %), with respect to the control (Zhang *et al.*, 2006).

Several factors may affect biomass distribution. According to Graciano *et al.* (2006), fertilization with phosphorus (P) applied to young *Eucalyptus grandis* plants generates increment of foliage and reduction in the root, and nitrogen (N) application increases root biomass without modifying foliage. Trees

DN (20 %) y volumen comercial del fuste (75 %) respecto al testigo (Zhang *et al.*, 2006).

Varios factores pueden afectar la distribución de biomasa. Según Graciano *et al.* (2006), la fertilización con fósforo (P) aplicado a plantas jóvenes de *Eucalyptus grandis* genera incremento del follaje y reducción en la raíz, y la aplicación de nitrógeno (N) aumenta la biomasa radical sin modificar el follaje. Los árboles poseen una jerarquía en la prioridad de partición de biomasa; en ésta, el incremento del tallo tiene menor prioridad que el follaje y raíces finas, lo que mejora la competencia por luz, agua y nutrientes (Oliver y Larson, 1996). Al aumentar la densidad de plantación, la competencia intraespecífica por el uso de suelo y subsuelo incrementa potencialmente y cambia las prioridades de partición (Burkes *et al.*, 2003). Otros factores que afectan la partición de biomasa son la calidad del sitio y disponibilidad de nutrientes (Wang *et al.*, 1998).

Debido al aumento de la superficie plantada y la importancia comercial y ambiental de *P. patula* Schl. *et* Cham. es necesario conocer la variación vertical de los componentes de biomasa y el efecto de tratamientos silvícolas sobre la misma. El objetivo del presente estudio fue analizar el efecto de aclareos bianual desde la edad de nueve años, a partir del 2004, sobre la distribución y acumulación de biomasa aérea en árboles de *P. patula* Schl. *et* Cham. plantados en Ixtlán, Oaxaca, México. La hipótesis fue que las intensidades de aclareo aplicadas en esta especie generan un aumento significativo en la cantidad y distribución de biomasa foliar, sin afectar la biomasa de los componentes aéreos restantes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Antecedentes de la plantación

La plantación de *P. patula* Schl. *et* Cham. fue establecida en 1995 en Ixtlán, Oaxaca, México, a 17° 22' 38.69" N y 96° 28' 44.8" O, en terrenos con 40 % de pendiente y altitud promedio de 2550 m. Se utilizó plántula obtenida de semilla recolectada de 50 árboles seleccionados del bosque natural de la misma comunidad. La preparación del sitio se hizo con maquinaria pesada y se plantó a densidades entre 3600 y 5675 árboles ha<sup>-1</sup>. En el 2004 se delimitaron seis parcelas de 20x20 m, separadas entre sí por una franja de protección de 10 a 15 m de ancho. En cinco parcelas se aplicaron aclareos en intervalos de dos años (2004, 2006 y 2008), y una parcela se dejó intacta como testigo. Los aclareos se hicieron con base en la densidad eliminada con respecto a la

have hierarchy in priority of biomass partitioning, according to this, stem increase has less priority than foliage and fine roots, which improves the acquisition of light, water, and nutrients (Oliver and Larson, 1996). At increasing plantation density, intra-specific competition for the use of soil and subsoil potentially increases and changes partition priorities (Burkes *et al.*, 2003) Other factors affecting biomass partition are site quality and nutrient availability (Wang *et al.*, 1998).

Due to the increase of planted area and commercial and environmental importance of *P. patula* Schl. *et* Cham., it is necessary to recognize the vertical variation of biomass components and the effect of silvicultural treatments on biomass. The objective of the present study was analyzing the effect of biennial thinning from the age of nine years on, starting in 2004, on the distribution and accumulation of aboveground biomass in trees of *P. patula* Schl. *et* Cham., planted in Ixtlán, Oaxaca, Mexico. The hypothesis was that thinning intensity applied to this species, generates significant increment in amount and distribution of leaf biomass, without affecting biomass of remaining aboveground components.

## MATERIALS AND METHODS

### Plantation antecedents

The *P. patula* Schl. *et* Cham. plantation was established in 1995 at Ixtlán, Oaxaca, Mexico, at 17° 22' 38.69" N and 96° 28' 44.8" W, in sites with 40 % slope and mean altitude of 2250m. Seedlings were used obtained from seed, harvested from 50 trees selected from natural forest of the same community. The site was prepared with heavy machinery and planted at densities between 3600 and 5675 trees ha<sup>-1</sup>. In the year 2004, six 20x20m plots were delimited, separated from each other by a buffer stripe of 10 to 15m width. In five plots, thinning was applied in two years' intervals (2004, 2006, and 2008), and one plot was left intact as control. Thinning was made based on eliminated density with respect to initial plantation density, and the silvicultural criterion of thinning from below was used, eliminating suppressed and intermediate trees. Before and after thinning the following measures were taken: normal diameter (DN, m), tree height (AT, m), basal area (AB, m<sup>2</sup>), and tree volume (V, m<sup>3</sup>); all the values were expressed by plot as well as by unit of area (ha).

### Sampling of trees and measured variables

In 2009, five trees per plot (30 trees in the study) were randomly selected and cut down, being sound and not forked, as

densidad inicial de plantación y se usó el criterio silvícola de aclareo por lo bajo, eliminando árboles suprimidos e intermedios. Antes y después del aclareo se midió: diámetro normal (DN, cm), altura de árbol (AT, m), área basal (AB, m<sup>2</sup>) y volumen por árbol (V, m<sup>3</sup>); todos los valores se expresaron por parcela y por unidad de superficie (ha).

### Muestreo de árboles y variables medidas

En el 2009 se seleccionaron aleatoriamente y derribaron cinco árboles por parcela (30 total), sanos y no bifurcados, pues el crecimiento típico de esta especie y su máximo valor comercial se alcanzan con fustes únicos. Después del derribo se midió diámetro (cm) de tocón con corteza, diámetro normal (DN, a 1.30 m), diámetro al inicio de copa viva, longitudes (m) del tocón a la punta del fuste (AT), del fuste limpio y de copa viva. En cada árbol se separaron las ramas del fuste y de cada rama se registró: número de posición (a partir de la base), altura de inserción (m) y diámetro basal a 1 cm del corte (cm), con un vernier Scala 222A<sup>®</sup> (Gimbel Mexicana S.A. de C.V.). El fuste completo se fraccionó en trozas de 1 m de largo; cada troza verde se pesó (PV, kg), con una báscula electrónica (Torrey<sup>®</sup>, serie EQB/EQM, con capacidad de 100 kg) y se midió su diámetro inferior y superior con corteza (cm), grosor de corteza (cm), y por diferencia se calculó el diámetro sin corteza (cm); luego el árbol se cubicó con el método de trozas sobrepuestas (Bailey, 1995). De la primera troza se obtuvieron dos rodajas (inferior y superior) de 5 cm de espesor; en el resto de las trozas sólo la superior. En campo se determinó el PV (g) de cada rodaja y el volumen verde por desplazamiento de agua (VV, cm<sup>3</sup>) en laboratorio. Las rodajas se secaron a 102 °C en estufa (Shel Lab FX14<sup>®</sup>; Cornelius) hasta peso constante y se registró el peso seco (PS, g) en balanza analítica (Sartorius<sup>®</sup> modelo SAR TALENT1 con capacidad de 1620 g). Con estos datos se determinó la gravedad específica de la madera por rodaja ( $GE=PS/VV$ , g cm<sup>-3</sup>). Con GE por rodaja (kg m<sup>-3</sup>) y VV con y sin corteza de cada troza, se calculó el PS de madera y de corteza de cada sección, y los valores acumulados por altura de sección del fuste (kg).

El volumen de rama (cm<sup>3</sup>) se calculó con la fórmula del cono. En la parte media de la copa, del lado norte, se eligieron aleatoriamente tres ramas con crecimiento medio y tres secciones de sus 5 cm de longitud se identificaron y metieron en bolsas de papel. En laboratorio se obtuvo el VV de cada sección por desplazamiento de agua, en una probeta de 250 mL, y se registraron los PV y PS (después del secado en estufa a 102 °C) en la balanza analítica. Con estos datos se calculó la GE de cada muestra y luego la GE promedio de rama por árbol (kg m<sup>-3</sup>). Para la biomasa de ramas individuales y de sección de fuste se usó el mismo procedimiento empleado en el componente madera.

the typical growth of this species and its maximum commercial value is reached having one single stem. After felling, diameter (cm) of the stump with bark was measured, normal diameter (DN, at 1.30m), diameter at the beginning of live crown, length (m) from stump to stem top (AT), from the clean stem and the live crown. On every tree the branches were separated from the stem, and of each branch number of position (starting from the base), branch-insertion height (m), and base diameter at 1 cm from the cut (cm) were recorded, using a Scala 222A<sup>®</sup> vernier (Gimbel Mexicana S.A. de C.V.). The complete stem was cut into logs of 1 m length; every green log was weighed (PV, kg) on an electronic balance (Torrey<sup>®</sup>, EQB/EQM series, with 100 kg capacity), and its lower and higher diameter were measured, including the bark (cm), bark thickness (cm), and diameter without bark (cm) was calculated by difference; subsequently, the volume of the tree was determined based on the overlapping bolt method (Bailey, 1995). From the first log two round slices of 5 cm thickness were obtained (lower and upper one); from the remaining log only the upper slice was taken. Under field conditions, PV (g) of each slice was determined as well as green volume by water displacement (VV, cm<sup>3</sup>) in laboratory. The log slices were dried at 102 °C in an oven (Shel Lab FX14<sup>®</sup>; Cornelius) until reaching constant weight, and dry weight (PS, g) was recorded with an analytic balance (Sartorius<sup>®</sup> model SAR TALENT 1 with capacity of 1620 g). With these data wood gravity per slice was determined ( $GE=PS/VV$ , g cm<sup>-3</sup>). Wood and bark PS of each section, as well as the accumulated values per section stem height (kg), were calculated with GE per slice (kg m<sup>-3</sup>) and VV of each log with and without bark.

Branch volume (cm<sup>3</sup>) was defined with the cone formula. In the middle part of the crown, on the north side, three branches of medium growth were chosen at random, and three of their sections of 5 cm length were identified and placed in paper bags. In the laboratory, VV of each section was obtained by water displacement in a 250 ml test tube, and PV and PS were registered (after drying in an oven at 102 °C) on analytic balance. Based on these data, GE of each sample, and later mean branch GE per tree (kg m<sup>-3</sup>) were calculated. For biomass of individual branches and of the stem section the same procedure was used as the one employed in timber components.

In foliage sampling, a subsample of 20 trees was randomly selected and the crown was divided into three sections of equal length. In each section, four to five branches were chosen at random (314 altogether), representing the entire stem. The needles were separated from the branches and put in paper bags with identification. Foliage was dried at 75 °C for 72 h, and leaf biomass per branch ( $B_{foliar}$ , g) was measured using an analytic balance.  $B_{foliar}$  of individual branches was estimated by means of the following linear equation, assuming that the area of

En el muestreo de acículas se seleccionó aleatoriamente una submuestra de 20 árboles y la copa se dividió en tres secciones de igual longitud. En cada sección se eligieron al azar cuatro a cinco ramas (314 en total), que representaran todo el fuste. Las acículas se separaron de las ramas y se metieron en bolsas de papel identificadas. El follaje se secó a 75 °C por 72 h y la biomasa foliar por rama ( $B_{foliar}$ , g) se midió en una balanza analítica. La  $B_{foliar}$  de ramas individuales se estimó mediante la siguiente ecuación lineal, bajo el supuesto de que el área de conducción total está afectada por la posición en la copa (Bond-Lamberty *et al.*, 2002):

$$B_{foliar} = 2.7 - 32.4 \times DBR^2 + 3.3 \times DBR^2 \times AR + 17.7 \times (DBR^2 \times X_1) + 15.5 \times (DBR^2 \times X_2)$$

donde,  $B_{foliar}$  = biomasa foliar por rama (g),  $DBR$  = diámetro basal de rama (cm),  $AR$  = altura de rama (m), y  $X_{1,2}$  = 1 si la rama estaba en la sección 1 (copa inferior), 2 (copa media) o 3 (copa superior, por omisión ya que el parámetro respectivo fue 0).

Con los 145 datos de biomasa foliar en ramas se hizo un análisis de regresión para el modelo, el cual tuvo una bondad de ajuste  $R^2$  de 0.80 y un error estándar de 1.7. Este modelo se usó para calcular la biomasa de acículas de 1328 ramas. La biomasa de acículas por sección de fuste se calculó con base en la altura de inserción de la rama en el fuste ( $AR$ ), con el modelo de  $B_{foliar}$ .

#### Análisis estadístico de los datos

La biomasa de los componentes (madera con corteza, follaje y ramas) de cada sección del fuste de cada árbol se sumó para obtener gráficos de distribución de biomasa acumulada. En los datos se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con el procedimiento UNIVARIATE de SAS (SAS Institute Inc., 2004). Los análisis de regresión se realizaron con los procedimientos GLM y MODEL y el método SUR (por sus siglas en inglés, Seemingly Unrelated Regressions) de SAS.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Biomasa acumulada de madera con corteza ( $BAM_{CC}$ )

El contenido mayor de biomasa de madera con corteza por árbol con mayor variabilidad ( $98.0 \text{ kg} \pm 52.1$ ) se obtuvo en la parcela 1, la de menor densidad residual ( $1250$  árboles  $\text{ha}^{-1}$ ), y el valor mínimo correspondió a la parcela testigo ( $35.3 \text{ kg} \pm 24.3$ ) con la densidad residual máxima. La biomasa por ha de este componente presentó el valor más alto en la parcela

total conduction be affected by its position in the crown (Bond-Lamberty *et al.*, 2002):

$$B_{foliar} = 2.7 - 32.4 \times DBR^2 + 3.3 \times DBR^2 \times AR + 17.7 \times (DBR^2 \times X_1) + 15.5 \times (DBR^2 \times X_2)$$

where  $B_{foliar}$  = leaf biomass per branch (g),  $DBR$  = basal branch diameter (cm),  $AR$  = branch height (m), and  $X_{1,2}$  = 1 if the branch was in section 1 (lower crown part), or 2 (middle crown), or 3 (upper crown, by omission, since the respective parameter was 0).

With the 145 data of leaf biomass in branches, regression analysis for the model was conducted, which had a statistical fitting with  $R^2$  of 0.80 and standard error of 1.7. This model was used to calculate biomass of aciculae 1328 branches. Aciculae biomass per stem section was calculated based on branch insertion height on the stem ( $AR$ ), using the model of  $B_{foliar}$ .

#### Statistical analysis of data

Biomass of the components (wood with bark, foliage, and branches) of each stem section of every tree was added up in order to obtain distribution graphs of accumulated biomass. In the data, the assumptions of normality and homogeneity of variances were tested with the SAS UNIVARIATE procedure (SAS Institute Inc., 2004). Regression analyses were conducted using the GLM procedure and MODEL, and the SUR method (Seemingly Unrelated Regressions) of SAS.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Accumulated wood and bark biomass ( $BAM_{CC}$ )

The highest content of wood biomass with bark per tree with the greatest variability ( $98.0 \text{ kg} \pm 52.1$ ) was obtained in plot 1, the one of lowest residual density ( $1250$  trees  $\text{ha}^{-1}$ ), and the lowest value corresponded to the control plot ( $35.3 \text{ kg} \pm 24.3$ ) with the greatest residual density. Biomass per hectare of this component had the highest value in plot 3 ( $156.2 \text{ t}$ ) with the highest thinning intensity (68.7%). Because of high residual density of the control ( $3625$  trees  $\text{ha}^{-1}$ ) the biomass in this treatment was the second largest ( $128.0 \text{ t ha}^{-1}$ ) (Table 1). These results agree with those by Costas *et al.* (2004), who point out that the higher the tree density, the greater the biomass per unit area and the lower the individual biomass in *Pinus taeda*, since at low or medium density not all the stand growth

3 (156.2 t), con la intensidad mayor de aclareo (68.7 %). Debido a la densidad residual alta del testigo (3625 árboles ha<sup>-1</sup>), su biomasa fue la segunda más alta (128.0 t ha<sup>-1</sup>) (Cuadro 1). Estos resultados coinciden con los de Costas *et al.* (2004), quienes indican que a mayor densidad de árboles, mayor biomasa por unidad de superficie y menor biomasa individual en *Pinus taeda*, pues a densidades bajas o medias no se usa todo el espacio de crecimiento. La biomasa menor se presentó en la parcela 2 (96.1 t ha<sup>-1</sup>), con la mayor densidad residual entre las aclareadas (2200 árboles ha<sup>-1</sup>) y la menor intensidad de aclareo (39.7 %) (Cuadro 1).

Debido a que la producción de biomasa aérea total está determinada por la naturaleza genética de los árboles, por las condiciones ambientales y de manejo del sitio, y por el nivel de ocupación del espacio de crecimiento disponible (Reineke, 1933; Yoda *et al.*, 1963; Corbett, 2001), el aclareo genera efectos sobre el tamaño de los árboles y la cantidad total de biomasa aérea en *P. patula*. El tiempo que tarda un sitio aclareado en recuperar su potencial de crecimiento es el tiempo de respuesta al aclareo, el cual fue cuatro años para *Pinus contorta* var. *latifolia* (Blevins *et al.*, 2005). En el presente estudio, sólo la parcela tres con mayor intensidad de aclareo (68.7 %) superó al testigo en biomasa por componente o total por ha (Cuadro 1). Así, los aclareos desde 2004 en términos de biomasa están justificados al eliminar al menos 68.7 % de la densidad inicial de plantación.

El efecto del aclareo sobre la  $BAM_{CC}$  se evaluó con el modelo de regresión que evalúa la biomasa de madera como una función de sus dimensiones combinadas (Reed y Tomé, 1998) y que describe el ahumamiento del fuste:

$$BAM_{CC} = \beta_0 \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1} - [\alpha_0 \times d^2 \times (AT - Am)]$$

donde,  $BAM_{CC}$  = biomasa acumulada de madera con corteza (kg),  $DN$  = diámetro normal con corteza (cm),  $AT$  = altura total (m),  $d$  = diámetro de la sección de fuste con corteza (cm), y  $Am$  = altura de la sección de fuste (m).

La primera parte de la ecuación que incluye a  $DN$  y  $AT$  determina la biomasa de madera en el fuste por árbol, cuyos parámetros de regresión se diferenciaron para biomasa sin aclareo y para aclareo ( $\beta_0 = \beta_{00} + \beta_{0A} \times \text{Aclareo}$ ). La segunda parte de la ecuación describe

space is used. The least biomass was found in plot 2 (96.1 t ha<sup>-1</sup>) with the highest residual density among the thinned plots (2200 trees ha<sup>-1</sup>) and the lowest thinning intensity (39.7%) (Table 1).

Due to the fact that total aboveground biomass production is determined by genetic nature of the trees, by environmental conditions, and site management, as well as by the level of available growth space occupation (Reineke, 1933; Yoda *et al.*, 1963; Corbett, 2001), thinning has impact on tree size, and total amount of aboveground biomass in *P. patula*. The time a thinned site takes to recuperate its growth potential is the time of recovery for thinning, which was four years for *Pinus contorta* var. *latifolia* (Blevins *et al.*, 2005). In the present study, only plot 3 with the highest thinning intensity (68.7%) surpassed the control in biomass by component or total per ha (Table 1). Thus, thinning since 2004 in terms of biomass has been justified at eliminating at least 68.7% of initial plantation density.

The effect of thinning on  $BAM_{CC}$  was assessed with the regression model which evaluates wood biomass as function of its combined dimensions (Reed and Tomé, 1998) and describes stem tapering:

$$BAM_{CC} = \beta_0 \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1} - [\alpha_0 \times d^2 \times (AT - Am)]$$

where  $BAM_{CC}$  = accumulated lumber biomass with bark (kg),  $DN$  = normal diameter with bark (cm),  $AT$  = total height (m),  $d$  = diameter of stem section with bark (cm), and  $Am$  = height of stem section (m).

The first part of the equation including  $DN$  and  $AT$  determines wood biomass in stem per tree, whose regression parameters were different for biomass with thinning and without thinning ( $\beta_0 = \beta_{00} + \beta_{0A} \times \text{Aclareo}$ ). The second part of the equation describes lumber biomass accumulation based on stem tapering, where the regression parameters in biomass were equally different, without thinning and with thinning ( $\alpha_0 = \alpha_{00} + \alpha_{0A} \times \text{Aclareo}$ ). The adjusted regression equations resulting for thinned condition and the control were:

$$BAM_{CC} = 0.0106 \times (DN^2 \times AT)^{1.026} - [0.014 \times d^2 \times (AT - Am)]$$

The adjusted model presented  $R^2 - aj$  of 0.96 and standard error of 6.5. All estimated parameters had

**Cuadro 1. Acumulación de biomasa aérea por componente y total por árbol y por hectárea y altura promedio y diámetro y altura promedio en parcelas aclareadas de *P. patula* en Ixtlán, Oaxaca, México.**

**Table 1. Aboveground biomass accumulation per component and total, per tree and per hectare, and diameter and mean height in thinned plots of *P. patula*, at Ixtlán, Oaxaca, México.**

Part.	DR (ha)	Nivel de aclareo		Biomasa (kg árbol <sup>-1</sup> ) ± D.E.						Biomasa por ha (t)						
		(m <sup>3</sup> ) <sup>†</sup>	(%) <sup>‡</sup>	Mad.	% <sup>§</sup>	Fol.	% <sup>§</sup>	Ram.	% <sup>§</sup>	Tot.	DN (cm)	AT (m)	Mad.	Fol.	Ram.	Tot.
3 (media)	1775	68.1	68.7	88.0 ± 25.0	86.7	4.5 ± 1.7	4.4	9.1 ± 4.6	8.9	101.5 ± 31.2	17.6	14.8	156	8	16.1	180.2
Test (alta)	3625	0	0	35.3 ± 24.3	88.8	1.5 ± 0.9	3.8	2.9 ± 2.5	7.4	39.7 ± 27.3	12.6	12.2	128	5.5	10.6	144.1
1 (baja)	1250	46.6	65.3	98.0 ± 52.1	85.8	5.4 ± 2.9	4.7	10.8 ± 6.4	9.5	114.2 ± 61.4	20.7	15.7	123	6.7	13.5	142.7
5 (media)	1900	107	58	61.0 ± 20.8	88.0	3.2 ± 1.9	4.6	5.1 ± 2.5	7.4	69.3 ± 24.7	16.8	14.9	116	6.1	9.8	131.7
4 (media)	1800	47.3	64	58.1 ± 17.5	90.1	2.3 ± 1.0	3.5	4.1 ± 3.1	6.4	64.5 ± 20.1	17.4	14.9	105	4.1	7.4	116.2
2 (media)	2200	32.2	39.7	43.7 ± 20.5	86.7	2.3 ± 1.4	4.6	4.4 ± 3.0	8.7	50.4 ± 24.6	16.2	12.9	96.1	5.1	9.6	110.8

DR = densidad residual en el aclareo 2008. D.E. = desviación estándar. DN = diámetro estándar. AT = altura total (m). Parc = parcela y entre paréntesis clasificación de DR. Mad = madera con corteza. Fol = follaje. Ram = ramas sin acículas. Tot = total. Test = testigo. ♦ DR = residual density in thinning 2008. DE = standard deviation. DN = normal diameter (cm). AT = total height (m). Parc = plot and in parentheses classification of DR. Mad = wood with bark. Fol = foliage. Ram = branches without aciculae. Tot = total. Test = control.

† Volumen acumulado extraído en los tres aclareos ♦ Accumulated volume extracted in the three thinning.

‡ Porcentaje de densidad extraída con respecto a la densidad inicial de plantación ♦ Percentage of density extracted with respect to initial plantation density.

§ Porcentaje del componente con respecto a la biomasa total ♦ Percentage of component with respect to total biomass.

la acumulación de biomasa de madera con base en el ahusamiento del fuste, donde igualmente se diferenciaron los parámetros de regresión en biomasa, sin aclareo y con aclareo ( $\alpha_0 = \alpha_{00} + \alpha_{0A} \times \text{Aclareo}$ ). Las ecuaciones de regresión ajustadas resultantes para la condición aclareada y el testigo fueron:

$$\text{BAM}_{\text{CC}} = 0.0106 \times (DN^2 \times AT)^{1.026} - [0.014 \times d^2 \times (AT - Am)]$$

El modelo ajustado presentó un  $R^2$ -aj de 0.96 y un error estándar de 6.5. Todos los parámetros estimados tuvieron significancia estadística ( $p \leq 0.006$ ), excepto  $\alpha_{0A}$  ( $p=0.34$ ), indicando que las intensidades de aclareo aplicadas a *P. patula* no afectaron la acumulación de biomasa de madera en el fuste, pero sí cambiaron la biomasa por árbol ( $\alpha_{0A}$ ,  $p \leq 0.0069$ ).

La biomasa de madera media por árbol en la parcela de baja densidad residual fue 98.0 kg y 35.3 kg en la parcela sin aclareo (alta densidad); sin embargo, la biomasa acumulada con ambas densidades fueron similares, 123.0 y 128.0 t ha<sup>-1</sup>. Esto se comprueba con la proporción de biomasa destinada al tallo, la cual fue semejante en todas las parcelas (entre 85.8 y 90.1 %) (Cuadro 1). Según Oliver y Larson (1996) la asignación de biomasa al tronco tiene menor prioridad que el conjunto follaje-ramas-raíces finas. Esto pudo haber ocurrido en *P. patula*, ya que individualmente los árboles de parcelas aclareadas tuvieron más biomasa de madera que los del testigo sin aclareo, pero como estos últimos tienen mayor densidad de plantación y mayor competencia por recursos del suelo y subsuelo, las prioridades de partición cambian, de modo que la biomasa total acumulada se mantiene sin cambio (Burkes *et al.*, 2003).

Según Nívar *et al.* (2002 y 2004), una característica deseable de las ecuaciones alométricas de regresión de los componentes del árbol es que la suma de las predicciones para los componentes sea igual a la predicción para el total de los árboles. En este caso, al emplear modelos que predicen la biomasa total o de una sección del fuste o copa, se está forzando la aditividad de las funciones de biomasa mediante los coeficientes de regresión para estimar el componente total, con regresiones lineales generalizadas (método SUR). De acuerdo con Monroy y Nívar (2004), este tipo de regresiones, comparada con los procedimientos de regresión lineal simple para los parámetros, por lo general obtienen mayores valores de  $t$  (para  $\text{BAM}_{\text{CC}}$ , entre  $-2.7$  y  $96.1$ ), menor varianza y

estadística significancia ( $p \leq 0.006$ ), excepto para  $\alpha_{0A}$  ( $p=0.34$ ), indicando que el aclareo aplicado a *P. patula* no afectó la acumulación de biomasa en el fuste, pero sí cambió la biomasa por árbol ( $\alpha_{0A}$ ,  $p \leq 0.0069$ ).

La biomasa media por árbol en el lote de baja densidad residual fue 98.0 kg y 35.3 kg en el lote sin aclareo (alta densidad); sin embargo, la biomasa acumulada con ambas densidades fueron similares, 123.0 y 128.0 t ha<sup>-1</sup>. Esto se comprueba con la proporción de biomasa destinada al tallo, la cual fue semejante en todas las parcelas (entre 85.8 y 90.1 %) (Tabla 1). Según Oliver y Larson (1996), la asignación de biomasa al tronco tiene menor prioridad que los compartimentos de follaje-ramas-raíces finas. Esto pudo haber ocurrido en *P. patula*, ya que individualmente los árboles de parcelas aclareadas tuvieron más biomasa de madera que los del testigo sin aclareo, pero como estos últimos tienen mayor densidad de plantación y mayor competencia por recursos del suelo y subsuelo, las prioridades de partición cambian, de modo que la biomasa total acumulada se mantiene sin cambio (Burkes *et al.*, 2003).

Según Nívar *et al.* (2002 y 2004), una característica deseable de las ecuaciones alométricas de regresión de los componentes del árbol es que la suma de las predicciones para los componentes sea igual a la predicción para el total de los árboles. En este caso, al emplear modelos que predicen la biomasa total o de una sección del fuste o copa, se está forzando la aditividad de las funciones de biomasa mediante los coeficientes de regresión para estimar el componente total, con regresiones lineales generalizadas (método SUR). De acuerdo con Monroy y Nívar (2004), este tipo de regresiones, comparada con los procedimientos de regresión lineal simple para los parámetros, por lo general obtienen mayores valores de  $t$  (para  $\text{BAM}_{\text{CC}}$ , entre  $-2.7$  y  $96.1$ ), menor varianza y menor efecto de heterocedasticidad, una característica implícita en las variables que estiman la biomasa de los recursos forestales (Acosta *et al.*, 2003). Esta forma de regresión, empleada en este estudio, es más eficiente, particularmente para el modelo  $\text{BAM}_{\text{CC}}$ , porque incrementa la precisión de los parámetros al utilizar simultáneamente el producto del número de árboles por el número de divisiones en la estimación total de la biomasa (e.g. 90 datos: 30 árboles  $\times$  3 secciones, madera, follaje, y ramas).

### Biomasa acumulada en acículas (BAA)

La biomasa foliar por árbol presentó su mayor valor en el lote 1 ( $5.4 \text{ kg} \pm 2.9$ ), que el de menor densidad



menor efecto de heterocedasticidad, una característica implícita en las variables que estiman la biomasa de recursos forestales (Acosta *et al.*, 2003). De esta manera, el procedimiento SUR aquí empleado es más eficiente, particularmente para el modelo de BA-M<sub>CC</sub> porque aumentó la precisión de los parámetros al utilizar simultáneamente el producto del número de árboles por el número de compartimentos en la estimación de la varianza total (*i. e.*, 90 datos: 30 árboles × 3 secciones, madera, follaje y ramas).

### Biomasa acumulada en acículas (BAA)

La biomasa foliar por árbol presentó su valor mayor en la parcela 1 (5.4 kg ± 2.9), la de menor densidad residual y sometida a alta intensidad de aclareo (65.3 %). El testigo, con la mayor densidad residual (100 %), mostró la menor biomasa (1.5 kg ± 0.9). La biomasa por hectárea fue mayor en la parcela 3 (8.0 t), cuya intensidad de aclareo fue la mayor (68.7 %), mientras que la menor biomasa por hectárea se obtuvo en la parcela 4 (4.1 t). La parcela 2, con la menor intensidad de aclareo (39.7 %), tuvo 5.1 t ha<sup>-1</sup>, un poco menos que el testigo (Cuadro 1).

En la parcela 4 la biomasa foliar por árbol fue 2.4 kg, poco mayor que la del testigo (1.5 kg), a pesar de haber tenido alta intensidad de aclareo (64.0 %). Sin embargo, las proporciones de biomasa foliar con respecto a la total fueron 3.5 % para la parcela 4 y 3.8 % para el testigo, con variación semejante en todos los casos (de 3.5 a 4.7 %). En *Hevea brasiliensis* la biomasa foliar disminuye al aumentar el diámetro y altura del árbol (Rojo-Martínez *et al.*, 2005). En contraste, en *P. patula* se encontraron resultados opuestos ya que las parcelas con mayor intensidad de aclareo tuvieron los árboles con mayores diámetros y biomasa en acículas; esto podría deberse a que contaron con mayor tiempo de respuesta al aclareo, pues según Hoover y Stout (2007) los efectos del aclareo pueden ser significativos a largo plazo.

La biomasa foliar acumulada se evaluó con el modelo de regresión, bajo el supuesto que el área de conducción de árboles de parcelas aclareadas y del testigo es proporcional a la biomasa foliar (Medhurst y Beadle, 2002):

$$BAA = \beta_0 \times DN^2 \times [e^{(-\beta_1 \times LCV)}] \beta_2$$

donde BAA = biomasa acumulada de acículas (kg), LCV = longitud de copa viva (m), DN ya definido,

density and subjected to high thinning intensity (65.3 %). The control, with highest residual density (100 %), had the least biomass amount (1.5 kg ± 0.9). Biomass per hectare was largest in plot 3 (8.0 t) whose thinning intensity was the highest (68.7 %), whereas the lowest amount of biomass per hectare was obtained in plot 4 (4.1 t). Plot 2 with the lowest thinning intensity (39.7 %) had 5.1 t ha<sup>-1</sup>, little less than the control (Table 1).

In plot 4 leaf biomass per tree was 2.4 kg, little higher than that of the control (1.5 kg) in spite of having had high thinning intensity (64.0 %). Nevertheless, foliar biomass proportions with respect to the whole were 3.5 % for plot 4 and 3.8 % for the control, with similar variation in all the cases (from 3.5 to 4.7 %). In *Hevea brasiliensis*, leaf biomass diminishes as tree diameter and height increase (Rojo-Martínez *et al.*, 2005). On the contrary, in *P. patula* opposite results were found, since the plots with the highest thinning intensity had the trees with the highest diameters and biomass in aciculae; this could be due to the fact that they had more time of recovery from thinning, since according to Hoover and Stout (2007), thinning effects may be significant in the long term.

Accumulated leaf biomass was evaluated with the regression model, supposing that the area of managing trees of thinned plots and of the control is proportional to foliar biomass (Medhurst and Beadle, 2002):

$$BAA = \beta_0 \times DN^2 \times [e^{(-\beta_1 \times LCV)}] \beta_2$$

where BAA = accumulated biomass of aciculae (kg), LCV = live crown length (m), DN defined above, and  $\beta_{0,1,2}$  = estimated regression parameters. For analyzing the effect of thinning on foliar biomass, the slope of the equation is different in biomass without thinning and biomass with thinning ( $\beta_1 = \beta_{11} + \beta_{1A} \times \text{Aclareo}$ , and  $\beta_2 = \beta_{22} + \beta_{2A} \times \text{Aclareo}$ ). The equation adjusted to estimating foliar biomass under thinning condition and in the control had R<sup>2</sup>- aj of 0.89 and standard error of 0.69, and were:

$$BAA = 0.0226 \times DN^2 \times [e^{(-0.1861 \times LCV)}]^{2.2763}$$

$$BAA = 0.0226 \times DN^2 \times [e^{(-0.0039 \times LCV)}]^{0.7657}$$

All regression parameters showed statistical significance (p ≤ 0.0003), which indicates that

y  $\beta_{0,1,2}$  = parámetros de regresión estimados. Para analizar el efecto del aclareo sobre la biomasa foliar, la pendiente de la ecuación se diferenció en biomasa sin aclareo y en biomasa con aclareo ( $\beta_1 = \beta_{11} + \beta_{1A} \times$  Aclareo, y  $\beta_2 = \beta_{22} + \beta_{2A} \times$  Aclareo). La ecuación ajustada para estimar la biomasa foliar en condición de aclareo y en el testigo presentó un  $R^2$ -aj de 0.89 y un error estándar de 0.69, y fueron:

$$BAA = 0.0226 \times DN^2 \times [e^{(-0.1861 \times LCV)}]^{2.2763}$$

$$BAA = 0.0226 \times DN^2 \times [e^{(-0.0039 \times LCV)}]^{0.7657}$$

Todos los parámetros de regresión mostraron significancia estadística ( $p \leq 0.0003$ ), lo que indica que los aclareos modificaron las tasas de acumulación de biomasa foliar.

La parte inferior de la copa de árboles sin aclareo tuvo más biomasa foliar que los árboles aclareados, ya que la altura de copa fue 7.2 m para el testigo y 7.6 m para árboles bajo aclareo, y la longitud de copa fue 8.2 m y 8.6 m. Los valores son diferentes, pues *P. patula* es una especie de poda natural difícil (San-Miguel *et al.*, 2003). Sin embargo, en la parte media de la copa (4 y 6 m arriba del inicio de copa) la biomasa foliar de árboles aclareados fue ocho a nueve veces mayor que la de árboles sin aclareo. Las diferencias entre ambas condiciones se mantienen en la punta de la copa, aunque la superioridad se redujo a cuatro veces (Figura 1). En una plantación de siete años de *Conocarpus erectus* se encontraron resultados similares, pues a dos años de aplicadas las intensidades de aclareo para remover hasta 67 % de las existencias, se incrementó la proporción de follaje con respecto a la biomasa total aérea y mejoró el crecimiento de la copa (Abohassan *et al.*, 2010). En el presente estudio, por árbol y por unidad de superficie se observó que la proporción de biomasa foliar con respecto a la total en todas las parcelas fue similar (entre 3.5 y 4.7 %).

Árboles de parcelas aclareadas tuvieron en promedio 3.5 kg de biomasa foliar *vs.* 1.5 kg del testigo, diferencia que en acumulación de biomasa equivale a 6.0 *vs.* 5.5 t ha<sup>-1</sup>. La cinética de acumulación de biomasa foliar en el fuste muestra los valores inferiores de la parcela 6 (testigo) respecto a las parcelas bajo aclareo, y que las de mayor acumulación de biomasa foliar corresponden a las intensidades de aclareo mayores (P3 y P1) (Cuadro 1).

thinning modified leaf biomass accumulation rates.

The lower part of the tree crown without thinning had more leaf biomass than the thinned trees, since crown height was 7.2 m for the control and 7.6 m for trees under thinning, and crown length was 8.2 m and 8.6 m. The values are different as *P. patula* is a species of difficult natural pruning (San-Miguel *et al.*, 2003). However, in the middle part of the crown (4 and 6 m above its beginning), foliar biomass of thinned trees was eight and nine times larger than that of trees without thinning. The differences between both conditions are maintained in the top of the crown, even though superiority was reduced by four times (Figure 1). In a seven-year-old *Conocarpus erectus* plantation similar results were found, since at two years of applying intensive thinning in order to remove up to 67 % of stock, foliage proportion increased with respect to total aboveground biomass, and crown growth improved (Abohassan *et al.*, 2010). In the present study we observed that –per tree and per surface unit– foliar biomass proportion was similar in all the plots with respect to the whole (between 3.5 and 4.7 %)

On average, trees of thinned plots had 3.5 kg of foliar biomass *vs.* 1.5 kg of the control, difference equivalent to 6.0 *vs.* 5.5 t ha<sup>-1</sup> in accumulation of biomass. Kinetics of leaf biomass accumulation on

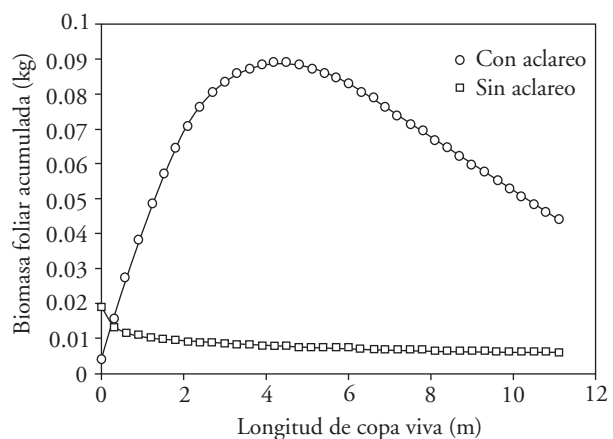


Figura 1. Estimación de biomasa acumulada en acículas, en la copa viva de *P. patula*, para las parcelas aclareadas y el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca, México.

Figure 1. Estimate of accumulated biomass in aciculae in live crown of *P. patula*, for the thinned plots and the control without thinning, at Ixtlán, Oaxaca, México.

Según Dey *et al.* (1996), cuando se producen heridas a los árboles o se reduce la densidad inicial se pueden producir efectos marcados sobre la disponibilidad de fotosintatos, lo que puede afectar la dinámica de crecimiento del follaje y la asignación de recursos a los otros órganos. En el presente estudio ocurrió esta situación en las parcelas bajo aclareo, ya que además de incrementar el crecimiento del fuste el aclareo tiende a aumentar el diámetro y longitud de copa de los árboles generando una mayor cantidad de follaje (Figura 1) (Chan *et al.*, 2006).

### Biomasa acumulada en ramas (BAR)

Las parcelas con mayor intensidad de aclareo (P3 y P1) generaron la mayor cantidad de biomasa de ramas por árbol, con  $9.1 \pm 4.6$  y  $10.8 \pm 6.4$  kg árbol<sup>-1</sup>. El testigo mostró el valor menor de este componente, con  $2.9 \pm 2.5$  kg árbol<sup>-1</sup>. La mayor cantidad de biomasa por unidad de superficie en ramas (16.1 t ha<sup>-1</sup>, parcela 3), correspondió a la mayor intensidad de aclareo (68.7 %) y la menor a la parcela 4 (7.4 t ha<sup>-1</sup>), con aclareo de 64.0 %. La biomasa en ramas para árboles sin aclareo fue 10.6 t ha<sup>-1</sup>. Aunque la biomasa de ramas por árbol de las parcelas aclareadas mostró un valor de 6.7 kg árbol<sup>-1</sup> *vs.* 2.9 kg árbol<sup>-1</sup> del testigo, los valores por hectárea fueron similares, 11.3 y 10.6 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 1). Según Niinemets y Lukjanova (2003), los incrementos de la radiación incidente sobre las ramas debidas al aclareo están asociados con aumentos en la longitud del fuste y con la extensión de las ramas, como se observó en la biomasa de ramas por árbol de *P. patula* en la condición de aclareo, en este estudio.

Para estimar *BAR* se utilizó el modelo de regresión que incluye la segunda fracción tipo Schumacher, modificado bajo el supuesto teórico de conducción que el área de tejido vivo conductivo es proporcional a la biomasa de ramas (Sterck y Bongers, 2001):

$$BAR = \beta_0 \times DCV^2 \times [e^{(-\beta_1 \times LCV)}] \beta_2$$

donde, *BAR* = biomasa acumulada en ramas (kg), *DCV* = diámetro de copa viva (m), *LCV* = longitud de copa viva (m), *e* = logaritmo neperiano = 2.7172, y  $\beta_{0,1,2}$  = parámetros de regresión estimados.

El efecto del aclareo sobre la biomasa en ramas se analizó como se hizo para los otros componentes de

the stem shows the inferior values of plot 6 (control) with respect to plots under thinning and that those of highest leaf biomass accumulation correspond to the highest thinning intensity (P3 and P1) (Table 1).

According to Dey *et al.* (1996), inducing wounds to trees or reducing initial density, marked effects on available photostats may be produced, which may affect foliage growth dynamics and allocation of resources to other organs. In the present study this occurred in plots under thinning, since besides increasing stem growth, thinning tends to increase tree crown diameter and length, generating higher amount of foliage (Figure 1) (Chan *et al.*, 2006).

### Biomass accumulated in branches (BAR)

Plots with higher thinning intensity (P3 and P1) produced larger quantity of branch biomass per tree, with  $9.1 \pm 4.6$  and  $10.8 \pm 6.4$  kg tree<sup>-1</sup>. The control showed the lowest value of this component, with  $2.9 \pm 2.5$  kg tree<sup>-1</sup>. The largest amount of biomass per surface unit in branches (16.1 t ha<sup>-1</sup>, plot 3) corresponded to the highest thinning intensity (68.7 %) and the least quantity to plot 4 (7.4 t ha<sup>-1</sup>) with 64.0 % of thinning. Biomass in branches for trees without thinning was 10.6 t ha<sup>-1</sup>. Although biomass of branches per tree of the thinned plots had a value of 6.7 kg tree<sup>-1</sup> *vs.* 2.9 kg tree<sup>-1</sup> of the control, the values per hectare were similar, 11.3 and 10.6 t ha<sup>-1</sup> (Table 1). According to Niinemets and Lukjanova (2003), increment of radiation influencing branches due to thinning is associated to the increment of stem length and branch extension, as observed in branch biomass per *P. patula* tree under thinning in this study.

In order to estimate *BAR* we utilized the regression model which includes the second fraction type Schumacher, modified theoretically assuming the conduction that the area of live conductive tissue is proportional to branch biomass (Sterck and Bongers, 2001):

$$BAR = \beta_0 \times DCV^2 \times [e^{(-\beta_1 \times LCV)}] \beta_2$$

where *BAR* = accumulated branch biomass (kg), *DCV* = diameter of live crown (m), *LCV* = length of live crown (m), *e* = Neperian logarithm = 2.7172, and  $\beta_{0,1,2}$  = estimated regression parameters.

biomasa, separando la pendiente de la ecuación ( $\beta_2 = \beta_{22} + \beta_{2A} \times \text{Aclareo}$ ) en biomasa sin aclareo y biomasa aclareada. Las ecuaciones que estiman la  $BAR$  en condición de aclareo y en testigo tuvieron un  $R^2$ -aj de 0.90 y 1.3 error estándar, fueron:

$$BAR = 0.0531 \times DCV^2 \times [e^{(-0.5761 \times LCV)}]^{20.1878}$$

$$BAR = 0.0531 \times DCV^2 \times [e^{(-0.5761 \times LCV)}]^{18.41}$$

Todos los parámetros mostraron significancia estadística ( $p \leq 0.0001$ ), excepto  $\beta_{2A}$  ( $p=0.57$ ), lo que indica que las intensidades aplicadas de aclareo no afectaron la acumulación de biomasa en ramas de *P. patula*. En promedio, el inicio de copa viva se presentó a 7.6 m de altura del fuste, punto cercano en el que las curvas de acumulación de biomasa en ramas cambian de inclinación y empieza a reducirse la distancia entre las cinéticas de parcelas aclareadas y el testigo. Según Alves y Santos (2002), la forma de la copa de los árboles dominantes (los de mayor altura en el rodal) es más variable que la de árboles suprimidos (de menor altura o rezagados), ya que los primeros pueden ser más flexibles en la distribución de la biomasa entre las estructuras del árbol. Esta condición no sucedió en la plantación estudiada, la cual presentó características homogéneas debido a la eliminación periódica de árboles suprimidos y de ramas inferiores, y evitó diferencias de copas y biomasa de ramas.

## CONCLUSIONES

Las intensidades de aclareo aplicadas bianualmente a *Pinus patula* desde el 2004, mediante extracciones de 39.7 a 68.7 % de la densidad y volumen por hectárea iniciales de plantación, afectaron la cantidad y distribución de biomasa foliar. La mayor cantidad de este componente se generó con altas intensidades de aclareo y, en consecuencia, con bajas densidades residuales. Los aclareos también influyeron en la cantidad de biomasa de madera con corteza en el fuste por árbol, pues las parcelas aclareadas y el testigo acumularon 98 y 35.3 kg árbol<sup>-1</sup>. Sin embargo, la biomasa contenida por hectárea fue similar entre ambas condiciones debido a la excesiva densidad residual del testigo, lo que permite deducir que sólo la intensidad de aclareo de 68.7% logró recuperar el potencial del sitio en un periodo de cinco años. Aunque la biomasa en ramas alcanzó un valor mayor para la condición de

The thinning effects on biomass in branches were analyzed the same way as for other biomass components, dividing the slope from the equation ( $\beta_2 = \beta_{22} + \beta_{2A} \times \text{Aclareo}$ ) into biomass without thinning and thinned biomass. The equations estimating  $BAR$  under thinning conduction and in control had  $R^2$ -aj of 0.90 and standard error of 1.3, and were:

$$BAR = 0.0531 \times DCV^2 \times [e^{(-0.5761 \times LCV)}]^{20.1878}$$

$$BAR = 0.0531 \times DCV^2 \times [e^{(-0.5761 \times LCV)}]^{18.41}$$

All parameters had statistical significance ( $p \leq 0.0001$ ), except  $\beta_{2A}$  ( $p=0.57$ ), which indicates that the intensity of applied thinning did not affect biomass accumulation in branches of *P. patula*. On average, the beginning of the live crown was at 7.6 m stem height, a close point to where biomass accumulation curves in branches change inclination, and the distance between kinetics of thinned plots and control begin diminishing. According to Alves and Santos (2002), the crown shape of the dominant trees (those of greatest height in the stand) is more variable than that of suppressed trees (of less height or overtopped trees), since the former may be more flexible in biomass distribution among the tree structures. This did not happen in the plantation under study, which had homogeneous characteristics, due to periodic elimination of suppressed trees and of lower branches, and thus avoided differences of crowns and branch biomass.

## CONCLUSIONS

Thinning intensity biennially applied to *Pinus patula* since 2004, by initial extractions from 39.7 to 68.7 % of density and volume per hectare of plantation, affected amount and distribution of foliar biomass. The highest quantity of this component was generated with high thinning intensity and consequently, low residual density. Thinning also influenced the amount of wood biomass with bark on the stem per tree, since the thinned plots and the control accumulated 98 and 35.3 kg tree<sup>-1</sup>. Nevertheless, the biomass contained per hectare was similar between both conditions, due to excessive residual density of the control, which allows deducing that only thinning intensity of 68.7 % succeeded in recovering the potential of the site within a period of

aclareo que para el testigo sin aclarar, la biomasa total de ramas por hectárea y su distribución en el fuste fueron similares en ambas condiciones.

### LITERATURA CITADA

- Abohassan, A., S. F. A. Tewfik, and A. O. El Wakeel. 2010. Effect of thinning on the above ground biomass of (*Conocarpus erectus* L.) trees in the western region of Saudi Arabia. *JKAU: Meteorol., Environ. Arid Land Agric. Sci.* 21: 3-17.
- Acosta M., M., F. Carrillo A., y O. S. Magaña T. 2003. Técnica de la silueta para estimar área foliar y biomasa aérea en especies forestales. *Ciencia Forestal en México* 28: 45-56.
- Alves L., V., and F. A. M. Santos. 2002. Tree allometry and crown shape of four tree species in Atlantic Rain Forest, south-east Brazil. *J. Trop. Ecol.* 18: 245-260.
- Antonio, N., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares, and L. Fontes. 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Can. J. For. Res.* 37: 895-906.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: an overlapping bolt method. *Can. J. For. Res.* 25: 170-173.
- Blevins, D. P., C. E. Prescott, H. L. Allen, and T. A. Newsome. 2005. The effects of nutrition and density on growth, foliage biomass, and growth efficiency of high-density fire-origin lodgepole pine in central British Columbia. *Can. J. For. Res.* 35: 2851-2859.
- Bond-Lamberty, B., C. Wang, and S. T. Gower. 2002. Above-ground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of northern Manitoba. *Can. J. For. Res.* 32: 1441-1450.
- Burkes, E. C., R. E. Will, G. A. Barron-Gafford, R. O. Teskey, and B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensive managed *Pinus taeda* and *P. elliotii* stands at different planting densities. *For. Sci.* 49:224-234.
- Chan, S. S., D. J. Larson, K. G. Maas-Hebner, W. H. Emmingham, S. R. Johnston, and D. A. Mikowski. 2006. Overstory and understory development in thinned and underplanted Oregon coast range Douglas-fir stands. *Can. J. For. Res.* 36: 2696-2712.
- Corbett, P. S. 2001. Carbon sequestration through rubber (*Hevea*) production on grassland in Papua New Guinea. *J. Rubber Res.* 4: 222-254.
- Costas, R., P. Mc Donagh, E. Weber, P. Irschick, y J. Palavecino. 2004. Efectos de la densidad de plantación y tratamiento de poda sobre la producción de *Pinus taeda* L. a los 6 años de edad. *Rev. For. Venezolana* 48: 117-125.
- Dey, S. K., D. Chaudhuri, K. G. Vinod, J. Pothan, and R. M. Sethuraj. 1996. Estimation of biomass in *Hevea* clones by regression methods: relation of girth and biomass for mature trees of clone RRIM 600. *Indian J. Natural Rubber Res.* 9: 40-43.
- Graciano, C., J. J. Guimet, and J. F. Goya. 2006. Fertilization and water stress interactions in young *Eucalyptus grandis* plants. *Can. J. For. Res.* 36:1028-1035.
- Hoover, C., and S. Stout. 2007. The carbon consequences of thinning techniques: stand structure makes a difference. *J. For.* 105: 266-271.
- five years. Even though biomass in branches reached higher value for thinning condition than for the control without thinning, total branch biomass per hectare and its distribution on the stem were similar under both conditions.

—End of the English version—



Jaakkola, T., H. Mäkinen M. P. Sarén, and P. Saranpää. 2005.

Does thinning affect the tracheid dimension of Norway spruce? *Can. J. For. Res.* 35: 2685-2698.

Leak, W. B. 2007. Thinning northern hardwoods in New England by dominant-tree removal-early results. *North J. Appl. For.* 24: 312-313.

Medhurst, J. L., and C. L. Beadle. 2002. Sapwood hydraulic conductivity and leaf area-sapwood area relationships following thinning of a *Eucalyptus nitens* plantation. *Plant, Cell and Environ.* 25: 1011-1019.

Monroy R., N., y J. J. Nívar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10: 29-43.

Nívar C., J. J., J. Nájera, E. Méndez, and V. Dale. 2002. Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern México. *Annals of For. Sci.* 59: 813-821.

Nívar C., J. J., N. González B., J. J. Graciano L., V. Dale, and B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, México. *Madera y Bosques* 10: 17-28.

Niinemets, Ü., and A. Lukjanova. 2003. Total foliar area and average leaf age may be more strongly associated with branching frequency than with leaf longevity in temperate conifers. *New Phytologist* 158: 75-89.

Oliver, C. D., and B. C. Larson. 1996. *Forest Stand Dynamic. Biological Resources Management Series.* Wiley, New York, USA. 520 p.

Pérez C., L. D., and M. Kanninen. 2003. Above ground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *J. Trop. For. Sci.* 15: 199-213.

Peri, P. L., V. Gargaglione, G. Martínez P., and M. V. Lencinas. 2010. Carbon accumulation along a stand development sequence of *Nothofagus antarctica* forests across a gradient in site quality in southern Patagonia. *For. Ecol. Manage.* 260: 229-237.

Reed, D. D., and M. Tomé. 1998. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation on plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *For. Ecol. Manage.* 103: 21-32.

Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J. Agric. Res.* 56: 627-638.

Rojo-Martínez, G. E., J. Jasso-Mata, J. J. Vargas-Hernández, D. J. Palma-López, y A. Velázquez-Martínez. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 449-456.

- San-Miguel, R., M. Gutiérrez, and A. Larqué-Saavedra. 2003. Biomass accumulation of *Pinus patula*. Southern J. Appl. For. 27: 52-54.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Sterck, F. J., and F. Bongers. 2001. Crown development in tropical rain forest trees: patterns with tree height and light availability. Br. Ecol. Soc. 89: 1-13.
- Wang, J. R., C. D. B. Hawkins, and T. Letchford. 1998. Relative growth rate and biomass allocation of paper birch (*Betula papyrifera*) populations under different soils moisture and nutrient regimes. Can. J. For. Res. 28:44-55.
- Yoda, K., T. Kira, H. Ogawa, and K. Hozumi. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (intraspecific competition among higher plants XI). J. Institute of Polytechnics, Osawa City University, series D. 14: 107-129.
- Youngblood, A. 2010. Thinning and burning in dry coniferous forests of the western United States: effectiveness in altering diameter distribution. For. Sci. 56: 46-60.
- Zhang, S. Y., G. Chauret, D. E. Swift, and I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. Can. J. For. Res. 36:945-953.