

ACUMULACIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE UNA PLANTACIÓN DE *Bambusa oldhamii*

CARBON ACCUMULATION IN THE ABOVEGROUND BIOMASS OF A *Bambusa oldhamii* PLANTATION

Arturo Castañeda-Mendoza¹, Jesús Vargas-Hernández¹, Armando Gómez-Guerrero¹,
Juan I. Valdez-Hernández¹, Humberto Vaquera-Huerta²

¹Programa Forestal. Instituto de Recursos Naturales. IRENAT, ²Programa en Estadística. Instituto de Socioeconomía y Estadística. ISEL. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (arturocm@colpos.mx, vargashj@colpos.mx)

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el potencial de una especie de bambú (*Bambusa oldhamii* Munro) para secuestrar carbono, se calculó la biomasa aérea total y su distribución por componentes (tallo, ramas y hojas), en una plantación de bambú de siete años utilizando ecuaciones alométricas de la forma $Y=aD^b$. Con base en una muestra de 22 culmos (fustes o tallos) por generación, se obtuvieron ecuaciones para las cuatro cohortes (grupos de edad) de culmos presentes (uno a cuatro años de edad). Con excepción del componente de ramas en la cohorte de tres años de edad, los coeficientes de determinación fueron mayores a 0.70 en todas las ecuaciones generadas. Las diferencias en la biomasa calculada para culmos de diámetro similar pertenecientes a diferentes cohortes permite calcular el incremento en biomasa asociado con la edad, a pesar de que el diámetro y altura del culmo permanecen constantes desde el primer año de edad. La biomasa acumulada en las cuatro cohortes presentes en la plantación fue 103.97 Mg ha⁻¹, de los cuales 83.7% se acumuló en el tallo, 12.3% en follaje y 4% en las ramas. El uso de los tallos de bambú en la construcción de casas implica que 43.4 Mg de C de la biomasa actual pueden ser transferidos a una reserva con un periodo de residencia promedio de 80 años.

Palabras clave: *Bambusa oldhamii*, ciclo de carbono, distribución de biomasa, ecuaciones alométricas, secuestro de carbono.

INTRODUCCIÓN

Los ciclos biogeoquímicos tienen una función importante en la dinámica de los ecosistemas de nuestro planeta. Teóricamente, el carbono almacenado por las plantas a través del proceso fotosintético excede la cantidad de carbono liberado a través de los procesos de respiración y descomposición de materia orgánica (Schlesinger, 1997). Sin embargo, la funcionalidad de los ecosistemas terrestres se ha visto

ABSTRACT

To evaluate the potential for carbon sequestration in a bamboo species (*Bambusa oldhamii* Munro), total aboveground biomass and its distribution in components (stem, branches and foliage) were evaluated in a 7-year-old bamboo plantation using $Y=aD^b$ form allometric equations. Using data from 22 culms (stems) per cohort (age group), biomass equations were developed for each of the four standing culm cohorts (one to four years old). Except for branches of the three-year-old cohort, determination coefficients were above 0.70. Even though stem diameter and height remain constant after the first year of age, differences in biomass estimated for culms of the same diameter from different cohorts allows estimation of yearly biomass increment. Aboveground biomass accumulated in the four standing cohorts of the plantation was 103.97 Mg ha⁻¹, of which 83.7% was found in stems, 12.3% in foliage and 4% in branches. The use of bamboo stems in house construction implies that 43.4 Mg of C of the present biomass can be transferred to a reservoir with a mean residence time of 80 years.

Key words: *Bambusa oldhamii*, carbon cycle, biomass distribution, allometric equations, carbon sequestration.

INTRODUCTION

Bio-geo-chemical cycles have an important function in the dynamics of the ecosystems of our planet. Theoretically, carbon stored by plants through the process of photosynthesis exceeds the amount of carbon released through the processes of respiration and decomposition of organic matter (Schlesinger, 1997). However, the functionality of land ecosystems has been undermined in the past 200 years by an imbalance in the carbon cycle, reflected in the increase in atmospheric CO₂, from 280 to 360 ppm (Hansen *et al.*, 1981; Schneider, 1994) caused mainly by burning of fossil fuels. Another important source is associated with deforestation, especially in primary forests, which store great amounts of carbon in

Recibido: Enero, 2004. Aprobado: Noviembre, 2004.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 39: 107-116. 2005.

rebasada en los últimos 200 años por un desbalance en el ciclo del carbono reflejado en el incremento del CO₂ atmosférico de 280 a 360 ppm (Hansen *et al.*, 1981; Schneider, 1994), siendo la principal causa la quema de combustibles fósiles. Otra fuente importante está asociada con la deforestación, especialmente en bosques primarios, los cuales almacenan grandes cantidades de carbono en la biomasa aérea y subterránea y en el suelo (Detwiler y Hall, 1988; Harmon *et al.*, 1990).

El cálculo de la biomasa es el primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas, y la contribución de los bosques tropicales en el ciclo global del carbono (Parresol, 1999; Ketterings *et al.*, 2001). En plantaciones forestales de ciclos cortos es común calcular biomasa aérea para tomar decisiones de manejo y definir los turnos de aprovechamiento en las condiciones de mercado (Verwijst y Telenius, 1999). En plantaciones de bambú la cosecha de culmos (fustes o tallos) se realiza anualmente, extrayendo los culmos maduros con el fin de mantener un equilibrio en la estructura de edades de la plantación, optimizando la producción de biomasa en el rodal (Kleinhenz y Midmore, 2001). La biomasa en plantaciones de bambú varía entre 40 y 306 Mg ha⁻¹, dependiendo de la especie, clima, fertilidad de suelo, densidad y edad de plantación (Virtucio *et al.*, 1994; Singh y Singh, 1999; Shanmughavel *et al.*, 2001; Hunter y Junqui, 2002).

En las áreas tropicales de México se han establecido plantaciones de bambú para recuperar terrenos deforestados y obtener productos forestales, manteniendo una cobertura forestal permanente para proteger el suelo. Además, las plantaciones de bambú funcionan como sistemas captadores de carbono, por lo que los productores están interesados en evaluar la productividad de estas plantaciones para obtener ingresos adicionales mediante la venta de créditos de carbono.

Con el propósito de evaluar el potencial del bambú para producir biomasa y acumular carbono, en el presente estudio se cuantificó la biomasa aérea total de una plantación de *Bambusa oldhamii* Munro de siete años de edad. Se determinó la estructura de la población de culmos de diferentes edades, se desarrollaron ecuaciones de estimación de biomasa aérea total y por componentes (tallos, ramas y follaje) para cada generación (cohorte) presente, y se obtuvo la distribución de la biomasa aérea en dichos componentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio y estructura de la población

El estudio se realizó en una plantación de *Bambusa oldhamii* Munro ubicada en el municipio de Huatusco, Veracruz, a 19° 08' N

aboveground and belowground biomass and in the soil (Detwiler and Hall, 1988; Harmon *et al.*, 1990).

Calculation of biomass is the first step in assessing the productivity of ecosystems and the contribution of tropical forests in the global carbon cycle (Parresol, 1999; Ketterings *et al.*, 2001). In short-rotation forest plantations it is common to calculate aboveground biomass to support decision-making and define harvest cycles under market conditions (Verwijst and Telenius, 1999). In bamboo plantations, mature culms (stems) are harvested annually to maintain a balance in the age structure of the plantation, optimizing the production of biomass in the stand (Kleinhenz and Midmore, 2001). The biomass in bamboo plantations varies between 40 and 306 Mg ha⁻¹, depending on the species, climate, soil fertility, plant density and plantation age (Virtucio *et al.*, 1994; Singh and Singh, 1999; Shanmughavel *et al.*, 2001; Hunter and Junqui, 2002).

In the tropical areas of México bamboo plantations have been established to recover deforested terrain and to obtain forest products, maintaining a permanent forest cover to protect the soil. Also, bamboo plantations function as carbon capture systems, and so growers are interested in assessing the productivity of these plantations to obtain additional income through the sale of carbon credits.

To evaluate the potential of bamboo to produce biomass and accumulate carbon, the present study was conducted to quantify total aboveground biomass of a seven-year-old plantation of *Bambusa oldhamii* Munro. The structure of the culm population was determined, equations for the estimation of total and component (stem, branches and foliage) aboveground biomass for each generation (cohort) were developed, and the aboveground biomass distribution in the components was obtained.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study site and population structure

The study was conducted in a *Bambusa oldhamii* Munro plantation located in the municipality of Huatusco, Veracruz, at 19° 08' N and 96° 57' W, and 1200 m above sea level. The plantation is on a hillside with a slope of 18%, facing the northeast. According to García (1973), the climate is semitropical type (A) C (m)b (i)g, with a mean annual temperature of 19 °C and an average yearly rainfall of 1746 mm. When the study was conducted, the plantation was seven years old and the last four cohorts of culms were present, since the first three had been harvested. Plantation density was 370 plants ha⁻¹ with spacing of 4.5×6 m, covering an area of 2 430 m². In 1995 the plantation was established at 9×6 m, and three years later the growers decided to double the initial density, planting new trees between the original rows.

y 96° 57' O, a 1200 m. La plantación se encuentra en una ladera con una pendiente de 18%, con exposición noreste. De acuerdo con García (1973), el clima es semicálido de tipo (A) C (m)b (i)g, con una temperatura media anual de 19 °C y una precipitación anual promedio de 1746 mm. Al momento de realizar el estudio, la plantación tenía siete años de edad y se encontraban presentes las últimas cuatro cohortes de culmos, pues las primeras tres ya habían sido cosechadas. La densidad de plantación es 370 plantas ha⁻¹ a un espaciamiento de 4.5×6 m y cubre una superficie de 2430 m². En 1995 se estableció a 9×6 m y tres años después los productores decidieron duplicar la densidad, plantando hileras intercaladas para obtener la densidad final.

Se realizó un inventario en el que se midió el diámetro normal (a 1.3 m sobre el suelo) y altura de todos los culmos en doce plantas tomadas al azar para conocer el intervalo diamétrico de cada generación presente y seleccionar los culmos a cosechar durante el muestreo destructivo. La intensidad del muestreo en el inventario fue 14.4%. Con la información de la muestra se determinó el diámetro y altura promedio, y la densidad de la plantación (número de culmos por planta y por hectárea) para cada categoría de edad. El área basal se calculó considerando la superficie transversal que ocupan los culmos en pie incluyendo su espacio hueco interior.

Cálculo y distribución de la biomasa aérea

Se seleccionaron 88 culmos repartidos en las cuatro cohortes (categorías de edad) dentro del intervalo en diámetro registrado en el inventario. Los culmos fueron derribados y separados en tallo, ramas y follaje; en cada uno se midió la altura total, el diámetro basal y el diámetro a la mitad del entrenudo más cercano a una altura de 1.3 m. De cada culmo se obtuvo el peso fresco de tallo, ramas y follaje. Adicionalmente se tomaron muestras de ramas y follaje de aproximadamente 150 g de la parte superior, media y baja de la copa, y secciones del tallo que incluyeran un nudo y un entrenudo cada 2 m a partir de la base. Las muestras se secaron en un horno eléctrico a 74 °C hasta alcanzar un peso constante. Con estos datos se obtuvo la relación peso seco/peso fresco de cada muestra, la que se usó para obtener los valores de materia seca (MS) para cada componente de los culmos. El peso seco total aéreo del culmo se obtuvo sumando el peso seco de los componentes. El muestreo destructivo se realizó en julio, cuando el follaje de los culmos maduros ha alcanzado su máximo desarrollo y los culmos de una nueva generación están por brotar.

Obtención de las ecuaciones y cálculo de la biomasa total por hectárea

Con los valores de biomasa aérea total se estimaron los coeficientes de regresión para el modelo:

$$Y = \alpha D^{\beta} \quad (1)$$

donde Y es la biomasa total (MS) en g, D es el diámetro (cm) a 1.3 m, y α y β son los parámetros a estimar. El modelo fue linealizado

An inventory was conducted measuring diameter at breast height (1.3 m above the ground) and height of all of the culms in twelve plants selected at random to determine the diametric range of each generation present and to select the culms to be harvested during the destructive sampling. Sampling intensity of the inventory was 14.4%. With the information from the sampling, average diameter and height and plantation density (number of culms per plant and per hectare) were determined for each age category. The basal area was calculated considering the cross-section area occupied by the standing culms, including its interior hollow space.

Calculation and distribution of aboveground biomass

Eighty-eight culms were selected from the four cohorts (age categories) within the diameter range recorded in the inventory. The culms were cut and separated into stem, branches and foliage. Each culm was measured for total height, base diameter and diameter of the internode closest to the height of 1.3 m. For each culm, fresh weight of stem, branches and foliage were obtained. Samples of approximately 150 g were also taken of branches and foliage from the upper, middle and lower parts of the crown, and sections of the stem that included one node and one internode every 2 m from the base up. The samples were dried in an electric oven at 74 °C until constant weight was reached. With these data, the ratio dry weight/fresh weight was obtained for each sample; this ratio was used to obtain the values of dry matter (DM) for each component of the culms. Total aboveground dry weight of the culm was obtained from the sum of the dry weight of the components. Destructive sampling was conducted in July when the foliage of the mature culms had reached maximum development and the culms of a new generation were about to sprout.

Generation of equations and calculation of total biomass per hectare

With the values of total aboveground biomass the regression coefficients were estimated for the model:

$$Y = \alpha D^{\beta} \quad (1)$$

where Y is the total biomass (MS) in g, D is the diameter (cm) at 1.3 m, and α and β are the parameters to estimate. The model was linearized by the logarithmic transformation of the variables to estimate the parameters using a simple linear regression model:

$$\ln(Y) = \ln(\alpha) + \beta \ln(D) \quad (2)$$

The regression analysis was performed with Proc Reg (SAS, 1995). The model used offers the advantage of being simple and precise and requires the most common variable (diameter) used in woody species (Ter-Mikaelian and Koruzkhin, 1997).

Given that the interest of the study was to determine the role of the plantation in the carbon cycle, and that the organic matter

mediante la transformación logarítmica de las variables para estimar los parámetros usando un modelo de regresión lineal simple:

$$\ln(Y) = \ln(\alpha) + \beta \ln(D) \quad (2)$$

El análisis de regresión se hizo usando Proc Reg (SAS, 1995). El modelo usado ofrece la ventaja de ser sencillo, preciso y requerir la variable más común (diámetro) usada en especies leñosas (Ter-Mikaelian y Koruzkhin, 1997).

Dado que el interés del estudio fue conocer la función de la plantación en el ciclo del carbono, y la materia orgánica de cada componente puede tener diferente destino y tasa de descomposición, se ajustó el modelo para biomasa aérea total y para cada componente por separado. Sólo en el caso de la generación más reciente (culmos de un año de edad) no se separaron las ramas del follaje, debido a que éstas aun no se encontraban lignificadas y no fue posible diferenciarlas. Las ecuaciones generadas se aplicaron a los datos del inventario previo para obtener los valores de biomasa de tallos, ramas, follaje y total por unidad de superficie en el terreno. Al calcular la biomasa con cada ecuación se aplicó el ajuste propuesto por Baskerville (1972) para eliminar el sesgo asociado a la transformación logarítmica del modelo, que expresado nuevamente en escala aritmética se define como (Wiant y Harner, 1979):

$$Y_{C_i} = e^{(\alpha+\beta \ln(D)+CME/2)} \quad (3)$$

donde Y_{C_i} es la biomasa calculada del i ésimo componente, e es la base del logaritmo natural y CME es el cuadrado medio del error calculado para cada componente y edad. Se calculó la biomasa de los culmos y se obtuvieron los valores promedio de biomasa por planta, considerando las plantas establecidas en las dos épocas de plantación (1995 y 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura de la población

El número de culmos por planta aumentó gradualmente hacia las generaciones más recientes, de 3.6 tallos en la cohorte más vieja (cuatro años de edad) a 8.8 en la más joven (un año de edad). Se observó también un aumento gradual en el diámetro y la altura promedio de los culmos de las cohortes de mayor edad a las más recientes (Cuadro 1), lo que indica que la población aún no alcanza un desarrollo completo y estable. Esta dinámica de crecimiento e incorporación de culmos es característica de una plantación joven, como se ha registrado en otros estudios (Virtucio *et al.*, 1994; Chrystanty *et al.*, 1996; Singh y Singh, 1999; Shanmughavel *et al.*, 2001). De acuerdo con la densidad de plantación establecida, se espera que la incorporación anual pueda alcanzar un promedio de 11 culmos por planta con diámetros de 10 cm y altura promedio de 22 m, como se ha observado en

of each component could have different uses and rates of decomposition, the model was adjusted for total aboveground biomass and for each component separately. Only in the case of the most recent generation (one-year-old culms) the branches were not separated from the foliage because these had not yet lignified and it was not possible to differentiate them. The equations generated were applied to the data from the inventory to obtain the values for biomass of stems, branches, and foliage and for total biomass per unit of area in the plantation. When calculating biomass with each equation, the adjustment proposed by Baskerville (1972) was applied to eliminate the bias associated with logarithmic transformation of the model, which, expressed again in arithmetic scale, is defined as (Wiant and Harner, 1979):

$$Y_{C_i} = e^{(\alpha+\beta \ln(D)+CME/2)} \quad (3)$$

where Y_{C_i} is the calculated biomass of the i^{th} component, e is the base of the natural logarithm and CME is the mean square of the error calculated for each component and age. Biomass of the culms was calculated and average values of biomass per plant were obtained, considering the plants established during the two periods of plantation (1995 and 1998).

RESULTS AND DISCUSSION

Structure of the population

The number of culms per plant increased gradually from the oldest to the most recent generations, 3.6 stems in the oldest cohort (four-years-old) to 8.8 in the youngest (one-year-old). A gradual increase in diameter and average height was observed from older culms to the most recent culms (Table 1), indicating that the population still had not reached complete, stable development. This dynamics of growth and incorporation of culms is characteristic of a young plantation, as has been recorded in other studies (Virtucio *et al.*, 1994; Chrystanty *et al.*, 1996; Singh and Singh, 1999; Shanmughavel *et al.*, 2001). According with the density of the plantation established, it is expected that the yearly incorporation could reach an average of 11 culms per plant with diameters of 10 cm and average height of 22 m, as has been observed in plantations established as windbreaks in the study area. For *Bambusa oldhamii*, the average height of the culms is 6 to 9 m with diameters of 5 to 8 cm (Shilin *et al.*, 1993); but Cusack (1997) reports heights of 18 m and diameters of 10 cm. The potential growth is determined largely by environmental conditions.

At seven years of age, the total density of culms still standing is 10 101 stems ha^{-1} . However, given that the plantation is young, it is likely that this density will increase in following generations, until incorporation of culms becomes stable (Farrelly, 1984). Assuming a stable incorporation of 11 culms per generation, and

Cuadro 1. Estructura de culmos de *Bambusa oldhamii* en las cuatro cohortes presentes al momento de realizar el estudio.
Table 1. Structure of *Bambusa oldhamii* culms in the four cohorts present when the study was conducted.

Variable	Edad del culmo (años)				Total
	4	3	2	1	
Densidad de culmos					
Culmos por planta	3.6	6.9	8	8.8	27
Culmos por ha	1332	2553	2960	3256	10 101
Diámetro medio (cm)	4.7	5.8	7.0	7.9	6.7
Intervalo diamétrico [†]	(2.8-6.8)	(3.9-8.0)	(5.1-8.9)	(5.3-9.9)	(2.8-9.9)
Área basal (m ² ha ⁻¹)	9.75	25.03	45.56	65.56	145.91
Altura media (m)	11.8	13.5	15.5	16.3	14.3
Intervalo en altura [†]	(9.8-4.2)	(10.2-15.4)	(14.0-16.4)	(14.0-18.0)	(9.8-18.0)

[†] Valores mínimo y máximo observados.

plantaciones establecidas en el área de estudio como barreras rompeviento. Para *Bambusa oldhamii*, la altura promedio que alcanzan los culmos es de 6 a 9 m con diámetros de 5 a 8 cm (Shilin *et al.*, 1993); pero Cusack (1997) reporta alturas de 18 m y diámetros de 10 cm. El potencial de crecimiento se determina en gran parte por las condiciones ambientales.

A una edad de siete años la densidad total de culmos que permanecen en pie es 10 101 tallos ha⁻¹. Sin embargo, dado que es una plantación joven, es probable que esta densidad aumente en las generaciones siguientes, hasta que se establezca la incorporación de culmos (Farrelly, 1984). Suponiendo una incorporación estable de 11 culmos por generación, y una extracción de los culmos mayores de cuatro años de edad, la densidad media sería 16 280 tallos ha⁻¹. Para la misma especie, Lin (1995) reportó 9600 a 18 000 culmos ha⁻¹, dependiendo de los objetivos de la plantación.

La densidad está determinada por el número de culmos que se incorporan, los que se remueven anualmente y los diámetros que alcanzan. La extracción disminuye el número de culmos por hectárea, pero abre espacio para el desarrollo de los culmos nuevos, lo cual se refleja en un incremento en sus dimensiones. En especies de bambú de tipo simpodial, los culmos jóvenes son más productivos que los viejos, por lo que se ha recomendado no cosechar los culmos menores de cuatro años de edad (Kleinhenz y Midmore, 2001). Los culmos viejos no presentan incremento en biomasa ni producen nuevos rizomas y, por el contrario, congestionan la planta haciendo difícil el manejo de la plantación (Lackshamana, 1991). Además del aumento gradual en las dimensiones de los culmos, también se observó una amplia variación en estas dimensiones dentro de cada generación, asociada principalmente a la diferencia de edades de la plantación original (50% de las plantas se estableció tres años después), lo que originó un menor desarrollo de los culmos en dichas plantas.

extraction of the culms over four years old, the mean density would be 16 280 stems ha⁻¹. For the same species Lin (1995) reported 9 600 to 18 000 culms ha⁻¹, depending on the objectives of the plantation.

Density is determined by the number of culms that are incorporated, those that are removed annually and the diameters they reach. Extraction reduces the number of culms per hectare, but it opens up space for the growth of new culms, which is reflected as an increase in their dimensions. In sympodial-type bamboo species, the young culms are more productive than the older culms, so harvesting culms younger than four years of age is not recommended (Kleinhenz and Midmore, 2001). Old culms do not increase in biomass nor do they produce new rhizomes, but instead congest the plant making plantation management difficult (Lackshamana, 1991). Besides the gradual increase in the dimensions of the culms, a wide variation in these dimensions is observed within each generation; this is associated mainly to the difference in ages of the original plantation (50% of the plants were established three years later), resulting in less culms growth in these plants.

Equations for calculating total and component biomass

To estimate total aboveground and component biomass in each generation, 15 equations were adjusted (Table 2). In all of the cases, the relationship between biomass and diameter was significant ($p \leq 0.01$) and the coefficient of determination (R^2) greater than 0.70, with the exception of the branches on three-year-old culms, where R^2 was 0.50. When the variable height was included in the model, R^2 increased slightly (1 to 2%); however, it was decided not to incorporate this variable due to the practical difficulty of measuring it in the field. Other conditions could explain part of the variability not incorporated by the models used, such as the

Ecuaciones para calcular biomasa total y por componentes

Se ajustaron 15 ecuaciones de estimación de biomasa, de los componentes y la biomasa aérea total en cada generación (Cuadro 2). En todos los casos la relación entre biomasa y diámetro fue significativa ($p \leq 0.01$) y, con excepción del componente ramas en los culmos de tres años de edad, donde el coeficiente de determinación fue 0.50, en todos los demás casos fue mayor de 0.70. Al incluir la variable altura dentro del modelo aumentó ligeramente (1 a 2%) el valor de R^2 ; sin embargo, se decidió no incorporar esta variable debido a la dificultad práctica para medirla en campo. Otras condiciones podrían explicar parte de la variabilidad no incorporada por los modelos utilizados, tales como las características del micrositio, la posición del culmo en el dosel, la edad del rizoma del que emerge cada culmo y la variabilidad genética; sin embargo, estos factores también son complicados de evaluar e incorporar en el modelo.

El ajuste del modelo (de acuerdo con los valores de R^2) aumenta con la edad del culmo, estabilizándose entre los tres y cuatro años de edad. En los coeficientes de regresión también se observa una tendencia con respecto a la edad de los culmos; por ejemplo, los valores de la pendiente (β) aumentan con la edad hasta los tres años y luego disminuyen en los culmos de cuatro años; mientras que el valor de α decrece conforme aumenta la edad. El incremento en la pendiente de la línea de regresión asociado con la edad del culmo implica que en los culmos de mayor edad se acumula una mayor cantidad de biomasa por cada unidad de aumento en diámetro (Figuras 1 y 2). Sin embargo, esta tendencia se rompe en los culmos de cuatro años de edad, que mantienen una biomasa estimada similar a la de los culmos de un año de edad, muy por debajo de lo esperado para su edad.

Es posible que la menor biomasa de los culmos de cuatro años de edad esté asociada con su menor altura promedio. Debido a su menor tamaño, estos culmos se encuentran suprimidos en el dosel, recibiendo menos cantidad de luz; además, es común que a medida que envejecen los culmos se reduzca el nivel de demanda de carbohidratos dentro de la planta (Kleinhenz y Midmore, 2001). Por tanto, las diferencias en la biomasa calculada para culmos de diámetro similar pertenecientes a diferentes cohortes permite estimar el incremento en biomasa asociado con la edad, a pesar de que el diámetro y altura del culmo permanecen constantes desde el primer año de edad.

Biomasa aérea total y su distribución por componentes y generación

La biomasa aérea total estimada en la plantación es 103.697 Mg ha⁻¹, distribuida en los culmos de las cuatro

características del micro-sitio, la posición del culmo en el dosel, la edad del rizoma del que emerge cada culmo, y la variabilidad genética. Sin embargo, es complicado evaluar e incorporar estos factores en el modelo.

El ajuste del modelo (de acuerdo con los valores de R^2) mejora con la edad del culmo, estabilizándose entre los tres y cuatro años de edad. En los coeficientes de regresión también se observa una tendencia con respecto a la edad de los culmos; por ejemplo, los valores de la pendiente (β) aumentan con la edad hasta los tres años y luego disminuyen en los culmos de cuatro años; mientras que el valor de α decrece conforme aumenta la edad. El incremento en la pendiente de la línea de regresión asociado con la edad del culmo implica que en los culmos de mayor edad se acumula una mayor cantidad de biomasa por cada unidad de aumento en diámetro (Figuras 1 y 2). Sin embargo, esta tendencia se rompe en los culmos de cuatro años de edad, que mantienen una biomasa estimada similar a la de los culmos de un año de edad, mucho menor de lo esperado para su edad.

Es posible que la menor cantidad de biomasa de los culmos de cuatro años de edad esté asociada con su menor altura promedio. Debido a su menor tamaño, estos culmos se encuentran suprimidos en el dosel, recibiendo menos luz. Además, es común que a medida que envejecen los culmos se reduzca el nivel de demanda de carbohidratos dentro de la planta (Kleinhenz y Midmore, 2001). Por tanto, las diferencias en la biomasa calculada para culmos de diámetro similar pertenecientes a diferentes cohortes permite estimar el incremento en biomasa asociado con la edad, a pesar de que el diámetro y altura del culmo permanecen constantes desde el primer año de edad.

Cuadro 2. Constantes, pendientes y valores de R^2 para las ecuaciones de biomasa total y por componente en cohortes de culmos de diferentes edades de *Bambusa oldhamii*.

Table 2. Constants, slopes and R^2 values for total and component biomass equations in *Bambusa oldhamii* culm cohorts of different ages.

Componente	Edad (años)	Coeficientes [†]		CME [¶]	R^2
		α	β		
Tallo	1	6.74	1.23	0.0172	0.73
	2	5.46	1.89	0.0275	0.75
	3	4.48	2.43	0.0227	0.93
	4	5.66	1.70	0.0224	0.83
Ramas	1	-	-	-	-
	2	2.75	1.82	0.0199	0.80
	3	3.93	1.47	0.1229	0.48
	4	3.40	1.70	0.0368	0.75
Follaje	1	4.57	1.29	0.0173	0.75
	2	4.36	1.48	0.0105	0.83
	3	4.03	1.66	0.0305	0.83
	4	4.59	1.36	0.0253	0.74
Total	1	6.85	1.24	0.0142	0.77
	2	5.75	1.84	0.0112	0.79
	3	5.07	2.23	0.0144	0.95
	4	6.02	1.64	0.0153	0.87

[†] α y β son los parámetros del modelo lineal.

[¶] CME es el cuadrado medio del error.

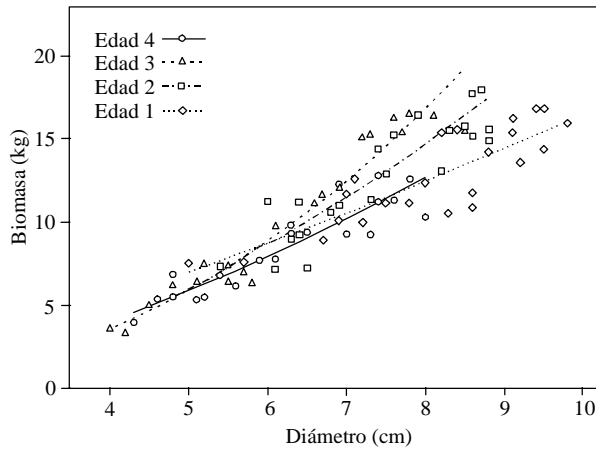


Figura 1. Dispersión de los datos reales y ecuaciones ajustadas (líneas) para biomasa aérea total por edad de culmo en una plantación de *Bambusa oldhamii*.

Figure 1. Dispersion of real data and adjusted equations (lines) for total aboveground biomass by culm age in a plantation of *Bambusa oldhamii*.

cohortes presentes. Esta biomasa representa una acumulación promedio de 25.92 Mg ha⁻¹ año⁻¹; sin embargo, la contribución de cada generación no es uniforme (Cuadro 3), ya que en términos absolutos las nuevas generaciones aportan una mayor proporción de biomasa que las de mayor edad. Lo anterior implica nuevamente que debido a la edad juvenil de la plantación, la población aún no se estabiliza; por tanto, se espera que la productividad y la biomasa total aumente gradualmente en las próximas generaciones.

Utilizando las ecuaciones desarrolladas para cada componente y sumando dichos valores para todas las generaciones, se obtiene una biomasa total de 103.852 Mg ha⁻¹, que difiere en 24 kg ha⁻¹ (0.02%) con respecto a la biomasa estimada con las ecuaciones de biomasa total. Carvalho y Parresol (2003) señalan la importancia de la aditividad como una propiedad deseable para estimar biomasa por componentes. Sin embargo, en el presente estudio la diferencia en la estimación de biomasa con los dos tipos de ecuaciones (*i. e.* biomasa total vs biomasa de componentes) es mucho menor de 1%; por tanto, no fue necesario forzar las ecuaciones para cumplir con la propiedad de aditividad.

A pesar de que la biomasa total de los componentes aumenta en las nuevas generaciones (Cuadro 3), la proporción de biomasa asignada al tallo se reduce conforme aumenta la edad del culmo, debido al desarrollo de las ramas y el follaje que en conjunto representan 11.6% en el primer año, pero aumenta hasta 24% en el cuarto (Figura 3). Debido tanto al aumento absoluto en biomasa de las nuevas generaciones de culmos como al desarrollo de las ramas y follaje asociado con la edad, se espera que en años siguientes los culmos cosechados aporten

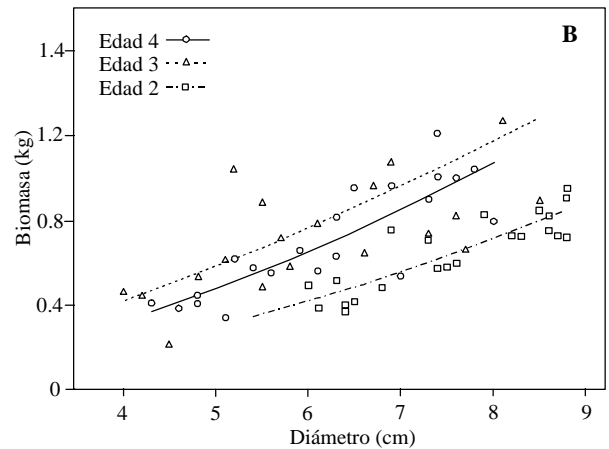
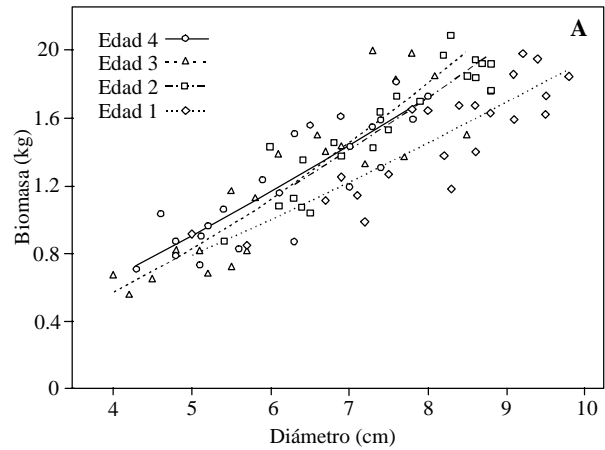


Figura 2. Dispersión de los datos reales y ecuaciones ajustadas (líneas) para biomasa de follaje (A) y ramas (B), por edad de culmo en una plantación de *Bambusa oldhamii*.

Figure 2. Dispersion of real data and adjusted equations (lines) for foliage (A) and branch (B) biomass, by culm age in a plantation of *Bambusa oldhamii*.

differences in biomass calculated for culms of similar diameter belonging to different cohorts allows estimation of increase in biomass associated with age, even though the diameter and height of the culm remain constant after one year of age.

Total aboveground biomass and its distribution by components and generation

The total aboveground biomass estimated in the plantation was 103.697 Mg ha⁻¹, distributed in the culms of the four existing cohorts. This biomass represents an average accumulation of 25.92 Mg ha⁻¹ year⁻¹. However, the contribution of each generation is uneven (Table 3), since in absolute terms the new generations contribute a greater proportion of biomass than the older ones. This implies, again, that due to the youth of the plantation,

**Cuadro 3. Distribución de biomasa aérea total (Mg ha^{-1}) por componente y edad de culmo en una plantación de *Bambusa oldhamii*.
Table 3. Distribution of total aboveground biomass (Mg ha^{-1}) by component and age of culm in a plantation of *Bambusa oldhamii*.**

Edad	Biomasa total [†]	Componente		
		Tallo	Ramas	Follaje
1	39.398	34.821 (88.4%)	-	4.585 (11.6%) [¶]
2	34.390	28.557 (83.0%)	1.663 (4.8%)	4.187 (12.2%)
3	21.177	16.779 (79.2%)	1.783 (8.4%)	2.615 (12.3%)
4	8.863	6.732 (76.0%)	0.722 (8.1%)	1.408 (15.9%)
Total	103.828	86.889	4.168	12.795

[†] Calculado con la ecuación de biomasa total.

[¶] Incluye ramas y follaje.

una mayor cantidad de biomasa al suelo, si se considera que las ramas y el follaje serán reincorporados a éste durante el aprovechamiento.

Suponiendo 50% de concentración de carbono en tejido vegetal (Brown, 1997), la cantidad de carbono retenida en la parte aérea de la plantación es 51.93 Mg ha^{-1} . Considerando que en la plantación existen culmos de uno a cuatro años de edad, la acumulación media de carbono de la plantación es $12.98 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Dado que la plantación está destinada a la fabricación de casas, y que sólo el tallo es utilizado para este propósito, $43.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ de la biomasa actual (un promedio de $10.85 \text{ Mg año}^{-1}$) pueden ser potencialmente transferidos a una reserva con 80 años de periodo medio de residencia, de acuerdo con los períodos de almacenamiento de carbono reportados por Skog y Nicholson (1998).

Las ecuaciones generadas utilizaron datos de una plantación de siete años de edad, donde estuvieron representadas las cuatro últimas cohortes (generaciones 4, 5, 6 y 7). Debido a que la plantación aún no se estabiliza en las dimensiones de los culmos de cada cohorte, la aplicación de estas ecuaciones en plantaciones de diferentes edades podría sobrestimar o subestimar la biomasa contenida. Tanto el diámetro como la altura promedio de los culmos pueden variar en una misma cohorte de dos plantaciones de la misma edad, si difiere la densidad de establecimiento y el manejo de las mismas. En el caso de las plantaciones de bambú, la información es insuficiente con respecto al impacto de las prácticas de manejo y ciclos de cosecha sobre la productividad.

CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio muestran que la pendiente de las ecuaciones de biomasa aumentó gradualmente con la edad de la cohorte en la plantación, lo cual sugiere que en esta especie de bambú la relación alométrica entre la biomasa y el diámetro del tallo se modifica con la edad de los culmos. La producción

the population has not yet stabilized; therefore, it is expected that the productivity and total biomass gradually increase in the succeeding generations.

Using the equations developed for each component and summing the values for all of the generations, a total biomass of $103.852 \text{ Mg ha}^{-1}$ is obtained; this is 24 kg ha^{-1} (0.02%) more than that estimated with equations for total biomass. Carvalho and Parresol (2003) point out the importance of additivity as a desirable property in the estimation of biomass by components. However, in our study, the difference in the estimation of biomass with the two types of equations (*i.e.* total biomass vs biomass of components) is much less than 1%; therefore, it was not necessary to force the equations to satisfy the property of additivity.

In spite of the fact that the total biomass of the components increased in the new generations (Table 3), the proportion of biomass assigned to the stem decreased

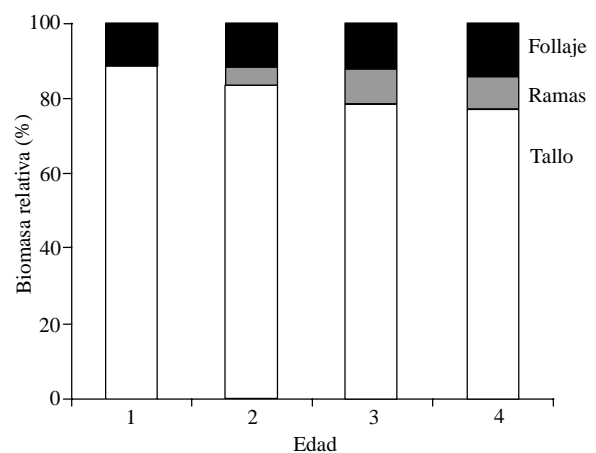


Figura 3. Distribución de la biomasa aérea por componente y edad de culmo en una plantación de *Bambusa oldhamii*.

Figure 3. Distribution of aboveground biomass by culm component and age of culm in a plantation of *Bambusa oldhamii*.

media anual de biomasa aérea en las últimas cuatro generaciones fue 25.72 Mg ha⁻¹, pero se espera una mayor productividad en los años siguientes, a medida que la plantación se estabilice en la incorporación y dimensiones de los culmos. Al momento de cosechar la cohorte cuatro años de edad, 24% de la biomasa aérea podrá ser reincorporada al suelo de la plantación, mientras que el resto se extraerá del sistema. Estos datos muestran que las plantaciones de bambú son una alternativa potencial para la captura de carbono en el trópico mexicano, con una productividad media comparable al de otras especies leñosas tropicales. Sin embargo, la cantidad y el tiempo medio de residencia (secuestro) del carbono dependerán de los productos obtenidos. Por tanto, es conveniente promover la investigación en este grupo de especies, tanto para obtener de productos maderables como para servicios ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sr. Rafael Guillaumin Fentanes, Presidente de Bambuver A.C., al Ing. Rafael Bejarano, y al equipo técnico de Bambuver A. C. las facilidades y el apoyo otorgado para la realización del trabajo de investigación. El estudio fue financiado por la Comisión Nacional Forestal a través del proyecto CONAFOR-2002-C01-6541 dentro del Fondo Sectorial para la Investigación Forestal.

LITERATURA CITADA

- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forest Paper 143, FAO, Roma.
- Baskerville, G. L. 1972. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2: 49-53
- Carvalho, J. P., and B. R. Parresol. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *For. Ecol. Manage.* 179: 269-276.
- Chrystanty, L., D. Mailly, and J. P. Kimmins. 1996. "Without bamboo, the land dies": Biomass, litterfall, and soil organic matter dynamics of a Javanese bamboo talun-kebun system. *For. Ecol. Manage.* 87: 75-88.
- Cusack, V. 1997. *Bamboo Rediscovered*. Earth Garden Books. Trentham, Victoria. 95 p.
- Detwiler, R. P., and C. A. S. Hall. 1988. Tropical forest and the global carbon cycle. *Science* 239: 42-47.
- Farrelly, D. 1984. *The Book of Bamboo*. Sierra Club Books. San Francisco, U.S.A. 332 p.
- García, E. 1973. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 246 p.
- Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind, and G. Russell. 1981. Climatic impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science* 213: 957-966.
- Harmon, M. E., W. K. Ferrell, and J. F. Franklin. 1990. Effects on carbon storage of conversion old-growth forests to young forests. *Science* 247: 699-702.
- Hunter, I. R., and W. Junqui. 2002. *Bamboo biomass*. International Network of Bamboo and Rattan. 11 p.
- Ketterings, Q. M., R. Coe, M. van Noordwijk, Y. Ambagau, and C. A. Palm. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric

with the age of the culm, due to the growth of branches and foliage, which together make up 11.6% in the first year, but this percentage increased up to 24% in the fourth year (Figure 3). Due to both the absolute increase in biomass of the new culm generations and the growth of branches and foliage associated with age, it is expected that in the following years the harvested culms will contribute a larger amount of biomass to the soil, if it is considered that the branches and foliage will be reincorporated at harvest.

Assuming a carbon concentration of 50% in plant tissue (Brown, 1997), the amount of carbon retained in the aboveground part of the plantation is 51.93 Mg ha⁻¹. Since there are one- to four-year-old culms in the plantation, the mean accumulation of carbon in the plantation is 12.98 Mg ha⁻¹ year⁻¹. Given that the plantation production is destined to house construction, and only the stems are used for this purpose, 43.4 Mg C ha⁻¹ of the current biomass (an average of 10.85 Mg year⁻¹) can be potentially transferred to a reservoir with a mean residence time of 80 years, according to the carbon storage periods reported by Skog and Nicholson (1998).

The equations generated used data from a seven-year-old plantation, where the last four cohorts were represented (generations 4, 5, 6 and 7). Because the plantation has not yet stabilized in terms of the dimensions of the culms of each cohort, the application of these equations in plantations of different ages could overestimate or underestimate the biomass content. Both average diameter and average height can vary in a single cohort of two plantations of the same age, if plant density and management differ. In the case of bamboo plantations, the information regarding the impact of management practices and harvest cycles on productivity is insufficient.

CONCLUSIONS

The results of this study show that the slope of the biomass equations increased gradually with the age of the cohort in the plantation, suggesting that in this species of bamboo, the allometric relationship between biomass and stem diameter changes with the age of the culms. The mean annual production of aboveground biomass in the last four generations was 25.71 Mg ha⁻¹, but higher productivity is expected in the following years, when culm incorporation and dimensions stabilize in the plantation. When the four-year-old cohort is harvested, 24% of the aboveground biomass can be reincorporated into the plantation soil, while the remainder will be extracted from the system. These data show that bamboo plantations are a potential alternative for carbon sequestration in the Mexican tropics, with a mean productivity comparable with other tropical woody

- biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *For. Ecol. Manage.* 146: 199-209.
- Kleinhenz, V., and D. J. Midmore. 2001. Aspects of bamboo agronomy. *Adv. Agron.* 74: 99-149.
- Lackshamana, A. C. 1991. Culm production of *Bambusa arundinacea* in natural forest of Karnataka, India. *In: Proceedings of the 4th International Bamboo Workshop on Bamboo in Asia and the Pacific.* Chiangmai, Thailand, November 27-30, 1991. Technical Document. Forspa Publication. s/p.
- Lin, Q. Y. 1995. Cultivation techniques for *Dendrocalamopsis oldhamii*. *In: Bamboo, People and the Environment.* Proceedings of the Vth International Bamboo Workshop and the IVth International Bamboo Congress. Ubud, Bali, Indonesia 19-22 June 1995, Volume 1: Propagation and Management. Raoww, I. V., C. B. Sastry and E. Widjaja (eds). International Network of Bamboo and Rattan, New Delhi, India. pp:50-55
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45(4): 573-593.
- SAS, 1995. SAS/ETS User's Guide, version 6, 2^{da} Ed. SAS Institute Inc., Cary, NC. 1022 p.
- Schlesinger, W. H. 1997. Biogeochemistry. An Analysis of Global Change. 2nd Ed. Academic Press. 582 p.
- Schneider, S. H. 1994. Detecting climatic change signals: Are they any "finger-prints"? *Science* 263: 341-347.
- Shanmughavel, P., R. S. Peddappaiah, and T. Muthukumar. 2001. Biomass production in an age series of *Bambusa bambos* plantations. *Biomass and Bioenergy* 20: 113-117.
- Shilin, Z., M. Naixun, and F. Maoyi. 1993. A Compendium of Chinese Bamboo. China Forestry Publishing House. 244p.
- species. However, the quantity and mean residence time (sequestration) of the carbon will depend on the products obtained from bamboo. Thus, it is advisable to promote research on this group of species, to obtain both products and environmental services.
- End of the English version—
- *
—————
- Singh, A. N., and J. S. Singh. 1999. Biomass, net primary production and impact of bamboo plantation on soil redevelopment in a dry tropical region. *For. Ecol. Manage.* 119: 195-207
- Skog, K. E., and G. A. Nicholson. 1998. Carbon cycling through wood products; The role of wood and paper products in carbon sequestration. *For. Prod. J.* 48: 75-83
- Ter-Mikaelian, M. T., and M. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty five North American tree species. *For. Ecol. Manage.* 97: 1-24
- Verwijst, T., and B. Telenius. 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *For. Ecol. Manage.* 121: 137-146.
- Virtucio, F. D., B. M. Manipula, and F. M. Schlegel. 1994. Culm yield and productivity of laak (*Sphaerobambos philipinensis*) *In: Proceedings 4th International Bamboo Workshop on Bamboo in Asia and the Pacific.* Chiangmai, Thailand, November 27-30, 1991. Technical Document Forspa Publication. s/p.
- Wiant, H. V., and E. J. Harner. 1979. Percent bias and standard error in logarithmic regression. *For. Sci.* 25(1): 167-168.