

COMPONENTS OF NET AERIAL PRIMARY PRODUCTION IN A *Bambusa oldhamii* PLANTATION

COMPONENTES DE LA PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE *Bambusa oldhamii*

Arturo Castañeda-Mendoza, J. Jesús Vargas-Hernández*, Armando Gómez-Guerrero

Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México.
co. (arturocm@colpos.mx), (vargashj@colpos.mx)*, (agomezg@colpos.mx)

ABSTRACT

Biomass production is an important criterion to be considered for the establishment of commercial forestry plantations for bioenergy production. In this study, an estimation of net aerial primary production (NAPP) was made in a young plantation of *Bambusa oldhamii* Munro from the sum of biomass production from growth of new culms, biomass increment of the pre-existing culms, and production of litter. Biomass production in the incorporated culms was 15.82 Mg ha⁻¹ year⁻¹, of which 13.77 Mg (87 %) corresponded to stems and 2.05 Mg (13 %) to foliage. Biomass increment in the pre-existing culms was 10.88 Mg ha⁻¹. One- and two-year-old cohort production was 7.31 and 3.57 Mg ha⁻¹. Litter production was 5.56 Mg ha⁻¹ year⁻¹. Results show that NAPP was 32.20 Mg ha⁻¹, with 50 % coming from incorporation of new culms, whereas 17 % of the NAPP is recycled in the system through litter. Estimated production of biomass in this plantation is comparable to that registered for high productivity bamboo plantations in other regions of the world.

Key words: bamboo, litter, biomass production, bioenergy, tropical forest species.

INTRODUCTION

The environmental deterioration caused by deforestation, the loss of sources of employment in the forestry sector, and the growing importance of finding renewable energy sources, make the establishment of commercial plantations with fast-growing species an important activity (Christersson and Verma, 2006). The

RESUMEN

La producción de biomasa es un factor importante a considerar para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales para la producción de bioenergía. En este estudio se realizó una estimación de la producción primaria neta aérea (NAPP, por sus siglas en inglés), en una plantación joven de *Bambusa oldhamii* Munro a partir de la producción total de biomasa del crecimiento de los culmos nuevos, aumento de la biomasa en los culmos pre-existentes y producción de residuos orgánicos. La producción de biomasa en los culmos incorporados fue 15.82 Mg ha⁻¹ año⁻¹, de las cuales 13.77 Mg (87 %) correspondieron a los tallos y 2.05 Mg (13 %) al follaje. El aumento de la biomasa en los culmos pre-existentes fue 10.88 Mg ha⁻¹. La producción de las cohortes de uno y dos años fue 7.31 y 3.57 Mg ha⁻¹. La producción de residuos orgánicos fue 5.56 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados muestran que la NAPP fue 32.20 Mg ha⁻¹, con 50 % proveniente de los culmos nuevos, mientras que 17 % de NAPP se recicla en el sistema a través de los residuos. La producción estimada de biomasa en esta plantación es comparable a la registrada en las plantaciones de bambú de alta productividad en otras regiones del mundo.

Palabras clave: bambú, residuos orgánicos, producción de biomasa, bioenergía, especies de bosques tropicales.

INTRODUCCIÓN

El deterioro ambiental causado por la deforestación, la pérdida de fuentes de empleo en el sector forestal, y la creciente necesidad de encontrar fuentes de energía renovables, ha hecho que el establecimiento de plantaciones comerciales con especies de rápido crecimiento se convierta en una actividad importante (Christersson y Verma, 2006). El interés en la plantación de especies de rápido crecimiento se debe a su potencial para la producción de

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: july, 2011. Approved: december, 2011.

Published as ARTÍCULO in *Agrociencia* 46: 63-74. 2012.

interest in planting fast-growing species is due to their potential for biomass production, providing high-energy outputs to replace conventional energy sources, particularly when they can be established in low fertility sites (Tiarks *et al.*, 1988). In Mexico, approximately 11 million ha have been identified with high potential for the establishment of forest plantations for wood production, although up to now, less than 450 000 ha had been established (CONAFOR)¹.

Productivity is a critical factor in the selection of species for the establishment of commercial plantations; therefore, studies focused on the evaluation of this silvicultural variable are required. Forest productivity refers to the biomass production or carbon balance of a stand that can be realized at a certain site with a given species (genotype) and a specified management regime (Skovsgaard and Vanclay, 2008). Specifically, net primary productivity (NPP) is defined as the total photosynthetic production that occurs in a given period, minus the losses due to respiration in that time (Clark *et al.*, 2001). However, since it is not easy to directly estimate NPP, measurements of dry mass per area incorporated per time unit is used as an indicator of NPP (Waring *et al.*, 1998).

In recent years, there has been interest in the establishment of fast-growing bamboo plantations in the tropical zones of México. Bamboo plantations can provide building material, replacing traditional building components with high CO₂ emission costs (Christersson and Verma, 2006). However, there have not been any studies in this region focused on the biomass productivity that can be achieved so far. Bamboo plantations open the possibility of integrating small property owners of rural communities in the formation of micro-industries with low-cost technologies for bio-energy production in short rotations, helping to mitigate global warming by sequestering atmospheric carbon (Dagilis and Trucke, 1998; Ganapathy *et al.*, 1999; Lobovikov *et al.*, 2009).

The purpose of the present study was to estimate the net aerial primary production (NAPP) in an eight-year-old *Bambusa oldhamii* Munro plantation, given by the biomass increment of existing culms, the biomass incorporation in new culms and the annual production of litter.

biomasa, proporcionando productos de gran energía que permiten sustituir las fuentes convencionales, sobre todo cuando esas especies se pueden establecer en sitios de baja fertilidad (Tiarks *et al.*, 1988). En México, se han detectado aproximadamente 11 millones de ha con alto potencial para establecer plantaciones forestales para la producción de madera, aunque a la fecha se han cultivado menos de 450 000 ha (CONAFOR)¹.

La productividad es fundamental en la selección de especies para establecer plantaciones comerciales; por tanto, se requieren estudios sobre evaluación de esta variable silvícola. La productividad de los bosques se refiere a la producción de biomasa o el balance de carbono de una plantación que puede obtenerse en un lugar determinado con una determinada especie (genotipo) y un régimen de manejo específico (Skovsgaard y Vanclay, 2008). Específicamente, la productividad primaria neta (NPP) se define como la producción fotosintética total que se produce en un período, menos las pérdidas debidas a la respiración en ese tiempo (Clark *et al.*, 2001). Sin embargo, debido a que no es fácil estimar directamente la NPP, las mediciones de materia seca incorporada por unidad de área y tiempo se usa como un indicador de NPP (Waring *et al.*, 1998).

En años recientes, el interés en el establecimiento de plantaciones de bambú de rápido crecimiento aumentó en las zonas tropicales de México. Las plantaciones de bambú pueden proporcionar materiales de construcción, reemplazando los componentes tradicionales de construcción con altos niveles de emisión de CO₂ (Christersson y Verma, 2006). Sin embargo, no hay estudios en esta región sobre la productividad de biomasa que se pueda obtener. Las plantaciones de bambú abren la posibilidad de integrar a los pequeños propietarios de las comunidades rurales en la creación de micro-industrias, con tecnologías de bajo costo para la producción de bioenergía en rotaciones cortas, ayudando a mitigar el calentamiento global mediante el secuestro de carbono atmosférico (Dagilis y Trucke, 1998; Ganapathy *et al.*, 1999; Lobovikov *et al.*, 2009).

El propósito del presente estudio fue estimar la producción primaria neta aérea (NAPP) en una plantación de *Bambusa oldhamii* Munro, de ocho años de edad, dada por el incremento de biomasa de los culmos existentes, la incorporación de biomasa en

¹CONAFOR. 2008. Programa Institucional 2007-2012. Comisión Nacional Forestal-SEMARNAT. Zapopan, Jalisco. 59 p.

MATERIALS AND METHODS

Site description

The study was carried out in a plantation of *B. oldhamii* Munro, located in municipality Huatusco, Veracruz, Mexico (10° 09' N and 96° 57' W; 1320 m elevation). The plantation is found on a hillside with a mean slope of 18 % and a north-eastern aspect. According to García (1973), the climate is type (A) C (m) b (i) g, with a mean annual temperature of 19 °C and average annual rainfall of 1746 mm. The soils correspond to ocric and vertic Andosol (FAO-UNESCO, 1988); they have a clay (67 % clay, 23 % sand, and 10 % loam) texture.

Plantation structure

Plantation density is 370 plants ha⁻¹, with a spacing of 6 m between plants and 4.5 m between rows, on an area of 2430 m². An inventory was made through a random sampling to determine the diametric structure of each cohort of culms (one to four years of age) present at the beginning of the study. Stem DBH was measured in all culms present in 12 randomly selected plants. The dry mass balance of culms was followed by three more years when the plantation was seven-years old. In order to get the initial allometric equations, minimal biomass removal was considered.

Estimation of aerial biomass

The aerial biomass present at the beginning of the study was estimated from the biomass equations developed for the plantation under study by Castañeda-Mendoza *et al.* (2005), and the data obtained from the diametric structure in the inventory for this work (Table 1). The biomass generated by incorporation of culms emerged during the last growing season was estimated by a biomass prediction equation for the culms belonging to the eighth generation, using a similar equation as for the seventh cohort (Table 1).

Estimation of biomass increment in pre-existing culms

Given that young culms of a bamboo plant increase their biomass in stem, branches, and foliage despite the fact that they do not grow neither in diameter nor in height after their first growing season, it is possible to estimate this increase from the equations generated for each cohort. For one- and two-year-old cohorts, the total biomass equations for cohorts one year older (two- and three-year-old) were applied, assuming that the culms would reach this biomass during the current year of growth. This

culmos nuevos y la producción anual de residuos orgánicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio

El estudio se realizó en una plantación de *B. oldhamii* Munro, ubicada en el municipio de Huatusco, Veracruz, México (10° 09' N y 96° 57' O; 1320 m de altitud). La plantación está en una ladera con una pendiente media de 18 %, con orientación al nor-este. Según García (1973), el clima es tipo (A) C (m) b (i) g, con temperatura media anual de 19 °C y precipitación media anual de 1746 mm. Los suelos corresponden al tipo ocrico y andosol vértico (FAO-UNESCO, 1988); tienen una textura arcillosa (67 % de arcilla, 23 % de arena, y 10 % de limo).

Estructura de la plantación

La densidad de la plantación es de 370 plantas ha⁻¹, con una separación de 6 m entre plantas y 4.5 m entre hileras, en una superficie de 2430 m². Se realizó un inventario con un muestreo aleatorio para determinar la estructura diamétrica de cada cohorte de culmos (uno a cuatro años de edad) presentes al inicio del estudio. El DBH del tallo se midió en todos los culmos presentes en 12 plantas seleccionadas al azar. El balance de materia seca de los tallos continuó por tres años más, hasta que la plantación tuvo siete años de edad. Para obtener las ecuaciones alométricas iniciales se realizó una eliminación mínima de biomasa.

Estimación de la biomasa aérea

La biomasa aérea presente al inicio del estudio se estimó con las ecuaciones de biomasa desarrolladas para la plantación en estudio por Castañeda-Mendoza *et al.* (2005), y con los datos obtenidos de la estructura diamétrica en el inventario de este trabajo (Cuadro 1). La biomasa generada por la incorporación de los culmos que surgieron durante la última temporada de crecimiento se calculó mediante una ecuación de predicción de la biomasa para los culmos de la octava generación, usando una ecuación similar a la de la séptima generación (Cuadro 1).

Estimación del incremento de la biomasa en los culmos pre-existentes

Debido a que los culmos jóvenes de una planta de bambú aumentan su biomasa en el tallo, ramas y follaje a pesar de que no crecen en diámetro ni en altura después de su primera estación de crecimiento, es posible estimar este aumento con las ecuaciones

Table 1. Age, number of culms per hectare, biomass equation, and aerial biomass accumulated in the cohorts present at the beginning of the study.**Cuadro 1. Edad, número de culmos por hectárea, ecuación de la biomasa, y biomasa aérea acumulada en las cohortes presentes al inicio del estudio.**

Cohort [†]	Age (years) [‡]	Culms (number ha ⁻¹)	Biomass equation [§]	Aerial biomass (Mg ha ⁻¹)
Four	4	1332	$Ln(B) = ln(6.02) + 1.64 ln(D)$	8.863
Five	3	2553	$Ln(B) = ln(5.07) + 2.23 ln(D)$	21.177
Six	2	2960	$Ln(B) = ln(5.75) + 1.84 ln(D)$	34.390
Seven	1	3256	$Ln(B) = ln(6.85) + 1.24 ln(D)$	39.398
Total		10 101		103.828

[†] Generation of culms after the establishment of the plantation ♦ Generación de culmos después del establecimiento de la plantación.

[‡] Age of the cohort at the beginning of the study ♦ Edad de la cohorte al comienzo del estudio.

[§] From Castañeda-Mendoza *et al.* (2005); B and D represent biomass and DBH ♦ De Castañeda-Mendoza *et al.* (2005); B y D representan la biomasa y el DBH.

procedure for biomass increment estimation was proposed by Taylor and Zisheng (1987) in three species of bamboo under natural conditions in a temperate forest in China. Thus, the biomass equation for two-year-old culms was applied to one-year-old culms, and the difference in biomass estimated with both equations was considered to be the increment in biomass during one year of growth. For two-year-old culms, the same procedure was applied using the equation for three-year-old culms; in the case of the three-year-old culms, a null increment was considered, given that the equation obtained for the four-year-old cohort did not allow simulation of the increment in biomass. Finally, four-year-old culms were harvested at the moment of beginning the study. We know that not including the three-year-old culms in the estimation of biomass increment leads to under-estimation of productivity. However, we had to use the data obtained with the allometric equations developed for the study plantation. Previous studies (Lakshamana, 1991; Upadhyaya *et al.*, 2008; Nath and Das, 2011) have shown that biomass increment in bamboo plants is concentrated in the young culms, mainly one- and two-year-old shoots; thus, the effect of the under-estimation is negligible.

Measurement of litter biomass

To estimate the biomass of ground litter three 27 m²-traps (4.5×6 m) were established within the plantation, ensuring that each trap represented the growth space of a plant. At the moment of litter collection, fresh weight was obtained and subsamples were oven dried at 80 °C until constant weight was achieved. Total dry matter was calculated for the litter collected in the trap from the fresh weight and moisture content of subsamples, including branches, foliage and culm sheaths. The litter caught in the traps was collected every 50 d during the period of December to August. Direct field observations in previous years indicated

generadas para cada cohorte. Para las cohortes de uno y dos años de edad se aplicaron las ecuaciones de biomasa total para cohortes de un año más (dos y tres años de edad), en el supuesto de que los culmos alcanzarían esta biomasa durante el año de crecimiento actual. Este procedimiento para calcular el aumento de la biomasa fue propuesto por Taylor y Zisheng (1987) en tres especies de bambú, en condiciones naturales, en un bosque templado de China. Así, la ecuación de la biomasa para los culmos de dos años se aplicó a los de un año, y la diferencia en la biomasa estimada con ambas ecuaciones se consideró como el aumento en la biomasa durante un año de crecimiento. Para los culmos de dos años de edad se aplicó el mismo procedimiento con la ecuación generada para los culmos de tres años. En el caso de los culmos de tres años, el aumento fue nulo debido a que la ecuación obtenida para la cohorte de cuatro años no permitió la simulación del aumento en biomasa. Por último, los culmos de cuatro años de edad se cosecharon al comenzar este estudio. El no incluir los culmos de tres años de edad en la estimación del aumento en biomasa implica subestimar la productividad. Sin embargo, hubo que usar los datos obtenidos con las ecuaciones alométricas desarrolladas para la plantación de este estudio. En estudios previos (Lakshamana, 1991; Upadhyaya *et al.*, 2008; Nath y Das, 2011), se ha mostrado que el incremento de biomasa en las plantas de bambú se concentra en los culmos jóvenes, principalmente en brotes de uno y dos años de edad, por lo que el efecto de la subestimación es insignificante.

Medición de la biomasa de residuos orgánicos

Para estimar la biomasa de la hojarasca se colocaron tres trampas de 27 m² (4.5×6 m) dentro de la plantación, asegurando que cada trampa representara el espacio de crecimiento de una planta. Al recolectar los residuos orgánicos se registró el peso fresco y las submuestras se secaron en un horno a 80 °C, hasta lograr

that litter production is concentrated in this dry period; given that in the study site the period of highest water stress is between February and May, it was considered that the sampling period for litter production was appropriate.

Net aerial primary productivity (NAPP)

Net aerial primary production was obtained through the sum of the biomass incorporated by the culms formed in the last growing season (B_{nc}), the increment in biomass of the two youngest cohorts present at the beginning of the study (BI_{oc}), and litter production (LB) (i.e., $NAPP = B_{nc} + BI_{oc} + LB$). The onset of culms sprouting (beginning of July) was used as reference, being the moment at which the youngest cohort reached one year of age.

Given that the study attempts to investigate productivity in the juvenile stage of a plantation that has not yet reached stability in height and diameter structure of different generations of culms, the estimated productivity can be considered conservative. Estimation considers that three-year-old culms do not increase their biomass; however, when biomass equations generated with culms of lower average height are applied to younger (one- and two-year-old) culms (cohorts seven and six, respectively), the biomass increment would be slightly under-estimated. The productivity will be stabilized once the plantation reaches a "normal" production of culms when reaching the maturity stage, and the dimensions of the new culms are more uniform.

RESULTS AND DISCUSSION

Structure of the plantation

After incorporation of culms from cohort eight and harvest of cohort four, the initial structure of culms in the plantation was modified. The number of culms per ha decreased from 10 101 to 9762, due to a lower production than expected in the youngest cohort (Figure 1). Culms production showed a gradual increase both in average height and diameter, as well as in the number of culms per plant in the first three cohorts (five to seven). However, in cohort eight only the average height increased with respect to the previous generations, with an average of 17.3 m.

Biomass of new culms

The increment in biomass associated with incorporation of new culms in the plantation was 15.82 Mg ha^{-1} , of which 13.77 Mg (87 %) corresponded to stems and 2.05 Mg (13 %) to foliage. Biomass produced by the new cohort of culms was

peso constante. Se calculó la materia seca total de los residuos recolectados en la trampa a partir del peso fresco y el contenido de humedad de las submuestras, incluyendo ramas, hojas y vainas de los culmos. Los residuos se recolectaron en las trampas cada 50 d durante el período de diciembre a agosto. Las observaciones directas de campo en los años anteriores señalaron que la producción de residuos se concentra en este período seco. Dado que en el lugar de estudio el período de mayor estrés hídrico es entre febrero y mayo, se consideró que el período de muestreo para la producción de residuos fue el apropiado.

Productividad primaria neta aérea (NAPP)

La NAPP se obtuvo al sumar la biomasa incorporada por los culmos nuevos formados en la última estación de crecimiento (B_{nc}), el aumento en la biomasa de las dos cohortes más jóvenes presentes al inicio del estudio (BI_{oc}), y la producción de residuos orgánicos (LB) (es decir, $NAPP = B_{nc} + BI_{oc} + LB$). El inicio de la brotación de los culmos nuevos (principios de julio) se usó como referencia, y fue el momento en que la cohorte más joven cumplió un año.

Dado que el estudio trata de investigar la productividad en la etapa juvenil de una plantación que aún no ha alcanzado estabilidad en altura y estructura diamétrica de las diferentes generaciones de culmos, la productividad estimada se consideraría conservadora. Esta estimación considera que los culmos de tres años de edad no aumenten su biomasa; sin embargo, cuando ecuaciones de biomasa generadas con culmos de menor altura promedio se aplican a los más jóvenes (uno y dos años de edad) culmos (cohorte siete y seis, respectivamente), hay una ligera subestimación del aumento en biomasa. La productividad se estabilizará una vez que la plantación alcance una producción "normal" de culmos, al llegar a la etapa de madurez, y las dimensiones de los nuevos culmos sean más uniformes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura de la plantación

Después de la incorporación de los culmos de la cohorte ocho y la cosecha de la cohorte cuatro, se modificó la estructura inicial de los culmos en la plantación. El número de culmos por ha se redujo de 10 101 a 9762, debido a una producción inferior a lo previsto en la cohorte más joven (Figura 1). La producción de culmos aumentó gradualmente, en altura y diámetro promedios, así como en el número de culmos por planta en las tres primeras cohortes (de cinco a siete). Sin embargo, en la cohorte ocho sólo la

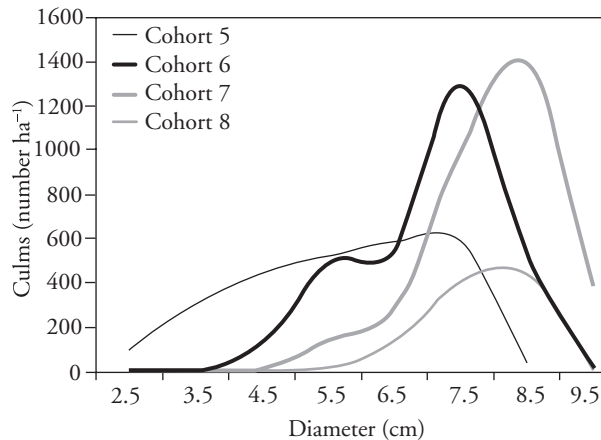


Figure 1. Distribution of culms per diametric category from cohort five to cohort eight in a plantation of *Bambusa oldhamii*.

Figura 1. Distribución de culmos por categoría diamétrica de las cohortes cinco a la ocho en una plantación de *Bambusa oldhamii*.

much lower than expected, given that total biomass of previous cohort (generation seven) was 39.4 Mg ha⁻¹ at one year of age, with an average of 8.8 culms per plant and 3256 culms ha⁻¹. In contrast, in the new cohort the average was 2.8 culms per plant and 1028 culms ha⁻¹.

Biomass increment in the pre-existing culms

Estimated increase in aerial biomass of pre-existing culms was 10.88 Mg ha⁻¹, of which 3.57 Mg correspond to cohort six (two-year-old at the beginning of the study), and 7.31 Mg to cohort seven, one-year-old at the beginning of the study (Table 2). Including both cohorts, 59.6 % of the increase in biomass was accumulated in the stems, 31.6 % in the branches and less than 10 % in the foliage.

Based on the initial biomass of cohorts six and seven, was drop is observed in the increase of total biomass with age, falling from 18.5% in cohort seven to 10.4 % in cohort six. Stem biomass increases 12.1 % after the first year of age, and 8.0 % the following year; branches doubled their biomass after the first year and increased an additional 71.2% in the second year, whereas foliage increased 18.6 and 2.6% after one and two years of age (Table 3).

Litter biomass

The period of maximum litter fall in the year occurred from February to July, with a duration of

altura media aumentó con respecto a las generaciones anteriores, con un promedio de 17.3 m.

Biomasa de los nuevos culmos

El incremento en biomasa relacionada con la incorporación de nuevos culmos en la plantación fue 15.82 Mg ha⁻¹, de los cuales 13.77 mg (87 %) correspondieron a los tallos y 2.05 Mg (13 %) al follaje. La biomasa producida por la nueva cohorte de culmos fue mucho menor de lo esperado, dado que la biomasa total de la cohorte anterior (la generación de siete años) fue 39.4 Mg ha⁻¹ al año de edad, con un promedio de 8.8 culmos por planta y 3256 culmos ha⁻¹. Por el contrario, en la nueva cohorte, el promedio fue 2.8 culmos por planta y 1028 culmos ha⁻¹.

Incremento de la biomasa en los culmos pre-existentes

El aumento estimado de la biomasa aérea de los culmos pre-existentes fue 10.88 Mg ha⁻¹, de los cuales 3.57 Mg corresponden a la cohorte seis (dos años de edad al inicio del estudio), y 7.31 Mg a la cohorte de siete años (un año al inicio del estudio) (Cuadro 2). Incluyendo las dos cohortes, 59.6 % del aumento en la biomasa se acumuló en los tallos, 31.6 % en las ramas y menos de 10 % en el follaje.

Con base en la biomasa inicial de las cohortes seis y siete, se observó una caída en el aumento de la biomasa total con la edad, de 18.5 % en la cohorte siete a 10.4 % en la cohorte de seis años. La biomasa del tallo aumentó 12.1 % después del primer año de edad y 8.0 % el año siguiente; las ramas duplicaron su biomasa después del primer año y aumentaron 71.2 % adicional en el segundo año, mientras que el follaje aumentó 18.6 y 2.6 % después de uno y dos años de edad (Cuadro 3).

Biomasa de los residuos orgánicos

El período de máxima caída de hojarasca en el año se produjo entre febrero y julio, con una duración aproximada de seis meses (Figura 2). Se calculó que la producción anual de residuos fue 5.56 Mg ha⁻¹, con un mínimo de 0.19 mg ha⁻¹ en agosto y un máximo de 1.93 Mg ha⁻¹ en marzo. La hojarasca y los residuos orgánicos de la cosecha anual (ramas y follaje) se acumularon en el suelo, formando una gruesa capa

approximately six months (Figure 2). Annual litter production was estimated at 5.56 Mg ha⁻¹ with a minimum amount of 0.19 Mg ha⁻¹ in August and a maximum of 1.93 Mg ha⁻¹ in March. The fallen litter and residues of the annual harvest (branches and foliage) accumulated in the soil, forming a thick layer of organic matter, which conserves soil moisture and minimizes surface run-off, and hence, erosion. Christanty *et al.* (1996) point out that this litter accumulation is due to the slow decomposition rate of bamboo foliage. In a mature bamboo stand (planted or natural), litter production should be equal to the production of new foliage; however, the total amount depends on culms density and stand management (Hunter and Junqui, 2002).

Net aerial primary productivity

The NAPP of the plantation was estimated in 32.20 Mg ha⁻¹ year⁻¹, of which 15.82 Mg (48.9 %) represent the biomass of new culms, 10.88 Mg (33.8 %) the biomass increase of pre-existing culms, and 5.56 Mg (17.3 %) litter production (Figure 3). The increase in standing aerial biomass was 26.7 Mg ha⁻¹. NAPP is a parameter that depends on diverse ecological factors, among which climatic and soil factors are outstanding, along with the capacity of the species to optimize conversion of available resources into biomass production. When bamboo plantations are established and management is not applied (harvest of culms for production or thinning), the annual rate of biomass production is characterized by a sigmoidal increase up to 3-5 years of age (Kleinhenz and Midmore, 2001). Removal of old culms prevents congestion within the plant, which reduces the production of shoots, affects quality of wood, and

de materia orgánica que conserva la humedad del suelo y reduce al mínimo la escorrentía superficial y, por tanto, la erosión. Christanty *et al.* (1996) señalan que esta acumulación de residuos orgánicos se debe a la descomposición lenta de las hojas de bambú. En un sitio de bambúes maduros (plantados o naturales), la producción de residuos debería ser igual a la producción de follaje nuevo; sin embargo, la cantidad total depende de la densidad de los culmos y el manejo del sitio (Hunter y Junqui, 2002).

Productividad de área primaria neta

La NAPP de la plantación se estimó en 32.20 Mg ha⁻¹ año⁻¹, de los cuales 15.82 Mg (48.9 %) representan la biomasa de los culmos nuevos, 10.88 mg (33.8 %) el aumento de la biomasa de los culmos ya existentes, y 5.56 Mg (17.3 %) la producción de residuos (Figura 3). El aumento de biomasa aérea en pie fue 26.7 Mg ha⁻¹. La NAPP es un parámetro que depende de diversos factores ecológicos, entre los que destacan los climáticos y del suelo, junto con la capacidad de las especies de optimizar la conversión de los recursos disponibles en la producción de biomasa. Cuando las plantaciones de bambú se han establecido y carecen de manejo (la cosecha de los culmos para la producción o adelgazamiento), la tasa anual de producción de biomasa se caracteriza por un aumento sigmoidal hasta los 3-5 años de edad (Kleinhenz y Midmore, 2001). La eliminación de los culmos viejos evita la congestión dentro de la planta, lo que reduce la producción de brotes, afecta la calidad de la madera, y dificulta el manejo de las plantaciones (Lakshamana, 1991). La cosecha anual de los culmos, tanto en poblaciones naturales como en plantaciones, permite mantener la productividad

Table 2. Initial biomass and absolute (Mg ha⁻¹ year⁻¹) and relative (%) increment in aerial biomass (stems, branches and foliage) of pre-existing cohorts in a plantation of *Bambusa oldhamii*.

Cuadro 2. Biomasa inicial e incremento absoluto (Mg ha⁻¹ año⁻¹) y relativo (%) de la biomasa aérea (tallos, ramas y follaje) de las cohortes pre-existentes en una plantación de *Bambusa oldhamii*.

Cohort	Age (years)	Initial biomass (Mg ha ⁻¹) [†]	Absolute (Mg ha ⁻¹ year ⁻¹) and relative (%) increment			
			Stem	Branches	Foliage	Total
Seven	1	39.40	4.20 (57.5)	2.25 (30.8)	0.85 (11.7)	7.31 (100)
Six	2	34.39	2.28 (63.8)	1.18 (33.2)	0.11 (3.0)	3.57 (100)
total			6.48 (59.6)	3.44 (31.6)	0.96 (8.8)	10.88 (100)

[†]Data taken from Castañeda-Mendoza *et al.* (2005) ♦ Datos tomados de Castañeda-Mendoza *et al.* (2005).

Table 3. Ratio (%) of increase in stem, branches, foliage and total biomass for cohorts six and seven related to the initial biomass in each component.

Cuadro 3. Proporción (%) del incremento de tallos, ramas, follaje y la biomasa total de las cohortes de seis y siete años en relación con la biomasa inicial de cada componente.

Cohort	Ratio (%) of biomass increase in each component			Total
	Stem	Branches	Foliage	
Seven	12.1	100.0	18.6	18.5
Six	8.0	71.2	2.6	10.4

makes difficult the management of plantations (Lakshamana, 1991). The annual harvest of culms, both in natural populations and plantations, makes it possible to maintain productivity at an optimum rate during a prolonged period of time, by controlling stand density and competition for growth space. In addition, it reassigns resources to younger culms, which provides an important link between new and productive culms (Hogarth and Franklin, 2009).

In the sympodial species of bamboo, young culms contain relatively younger and more productive foliage, and their transport tissues are more effective than in older culms (Liese, 1998); metabolism residues are accumulated in the stem tissues, progressively reducing water and nutrients transport in the xylem, and photosynthates in the phloem, which finally causes death of shoots (Liese, 1998). According to Lakshamana (1991), one-year-old culms contribute with 77 % in the production of new shoots, whereas two-year-old and older culms contribute with 20 and 3 %. Other authors (Kleinhenz and Midmore, 2001; Banik and Nurul, 2005; Li *et al.*, 2007) point out the same tendency in other studies, so the contribution of culms over two years of age to total productivity is minimal. Therefore, harvesting the culms over three years of age is recommended; at this age, enough stem maturity is reached for a large variety of products, especially “wood” products.

In this sense, the NAPP assessed in the present study can be considered as a conservative estimate or the lower limit of real productivity in the plantation, considering that the anatomical and phenological characteristics of bamboos make it possible to assume that there is a marginal increase in the cohorts over three years of age. The harvest regime in the

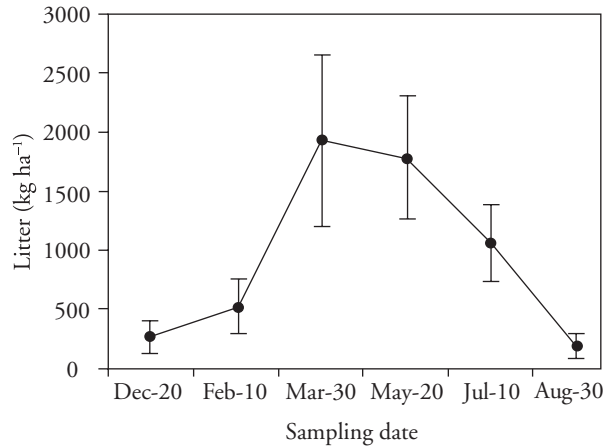


Figure 2. Litter production in an eight-year-old *Bambusa oldhamii* plantation. Bars indicate the standard error (n=3).

Figura 2. Producción de residuos orgánicos en una plantación de *Bambusa oldhamii* de ocho años de edad. Las barras indican el error estándar (n=3).

a una tasa óptima durante un período prolongado de tiempo, al controlar la densidad del lugar y la competencia por el espacio de crecimiento. Además, se reasignan recursos a los culmos más jóvenes, lo que proporciona un vínculo importante con los culmos nuevos y productivos (Hogarth y Franklin, 2009).

En las especie simpodiales de bambú, los culmos jóvenes tienen follaje relativamente más joven y más productivo, y sus tejidos de transporte son más efectivos que en los culmos más viejos (Liese, 1998). Los residuos del metabolismo se acumulan en los tejidos del tallo, reduciendo gradualmente el agua y el transporte de nutrientes en el xilema y los fotosintatos en el floema, lo que finalmente provoca la muerte de los brotes (Liese, 1998). Según Lakshamana (1991), los culmos de un año de edad contribuyen con 77 % en la producción de nuevos brotes, mientras que los de dos años y mayores aportan 20 y 3 %. Otros autores (Kleinhenz y Midmore, 2001; Banik y Nurul, 2005; Li *et al.*, 2007) señalan que la contribución de los culmos de más de dos años de edad a la productividad total es mínima. Por tanto, se recomienda cosechar los culmos de más de tres años de edad; a esta edad, la madurez de los tallos es suficiente para obtener una gran variedad de productos, especialmente los de “madera”.

En este sentido, la NAPP evaluada en el presente estudio puede considerarse como una estimación conservadora, o el límite inferior de la productividad

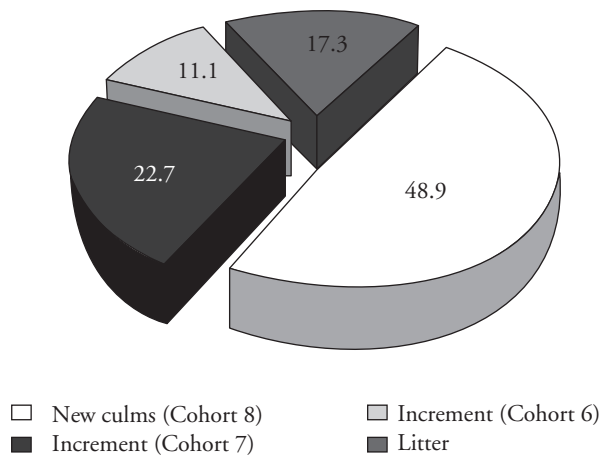


Figure 3. Contribution (%) of new culms, biomass increment of culms present, and litter production to the NAPP of an eight-year-old plantation of *Bambusa oldhamii*.

Figura 3. Contribución (%) de los culmos nuevos, incremento en la biomasa de los culmos presentes, y producción de residuos orgánicos en la NAPP de una plantación de *Bambusa oldhamii* de ocho años de edad.

plantation under study considers removal of four-year-old culms, an age suggested by diverse authors (Kleinhenz and Midmore, 2001; Wahab *et al.*, 2010; Nath and Das, 2011). However, it is important to investigate the implications of this regime on plantation productivity and quality of products obtained.

The maximum values of NAPP found in bamboo species are between 10 and 30 Mg ha⁻¹ year⁻¹ (Table 4), within the interval registered for plantations with conventional tree species (Hunter and Junqui, 2002). The intensive management of bamboo plantations may result in a greater production of biomass if the high production rates are maintained for a longer period of time. Soil fertility is a factor of great importance for maintaining site productivity, given the continuous nutrient extraction from the system which accumulates in the culms biomass (Krishnankutty and Chundamanil, 2005). Therefore, it is suggested to carry out studies focused on availability of essential nutrients for plant growth and on recycling processes.

Total aerial biomass in the study plantation after eight years was 144.36 Mg ha⁻¹; however, due to the annual harvest of four-year-old culms, the standing aerial biomass present at that date was 117.28 Mg ha⁻¹. Figure 4 shows the changes in biomass accumulation of the plantation considering the

real de una plantación, considerando que las características anatómicas y fenológicas de los bambúes permiten suponer que hay un aumento marginal en las cohortes de más de tres años de edad. El régimen de cosecha en la plantación en estudio considera necesario eliminar los culmos de cuatro años de edad, que es la edad recomendada por diversos autores (Kleinhenz y Midmore, 2001; Wahab *et al.*, 2010; Nath y Das, 2011). Sin embargo, es importante investigar las consecuencias de este régimen en la productividad de las plantaciones y la calidad de los productos obtenidos.

Los valores máximos de NAPP en las especies de bambú están entre 10 y 30 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 4), dentro del intervalo registrado para plantaciones con especies convencionales (Hunter y Junqui, 2002). El manejo intensivo de las plantaciones de bambú puede resultar en una mayor producción de biomasa, si se mantienen altas tasas de producción durante un período de tiempo prolongado. La fertilidad del suelo es un factor de gran importancia para mantener la productividad del sitio, dada la continua extracción de nutrientes del sistema que se acumula en la biomasa de los culmos (Krishnankutty y Chundamanil, 2005). Por tanto, se sugiere realizar estudios sobre la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y los procesos de reciclaje.

La biomasa total aérea en la plantación en estudio, después de ocho años fue 144.36 Mg ha⁻¹; sin embargo, debido a la cosecha anual de culmos de cuatro años de edad, la biomasa aérea en pie en esa fecha era 117.28 Mg ha⁻¹. La Figura 4 muestra los cambios en la acumulación de biomasa de la plantación, considerando la biomasa extraída en los cuatro ciclos de cosecha en los últimos cuatro años. En diversas especies de bambú, se han registrado variaciones en la producción anual de culmos, que se explican tanto por la densidad de la plantación, como por la intensidad de la cosecha (Raghubanshi, 1994; Singh y Kochhar, 2005). La intensidad de la cosecha tiene implicaciones tanto en la modificación de la estructura de edad del follaje restante (tejido fotosintéticamente activo), como en la distribución y translocación de los asimilados entre los culmos de diferentes edades.

CONCLUSIONES

Las especies de bambú, especialmente la *Bambusa oldhamii*, son de crecimiento rápido, con alta

Table 4. Comparison of NAPP estimates in bamboo plantations with respect to other tropical tree species.**Cuadro 4. Comparación de las estimaciones de NAPP en plantaciones de bambú con respecto a otras especies de árboles tropicales.**

Species	NAPP (Mg ha ⁻¹ year ⁻¹)	Author
Bamboo species:		
<i>Bambusa bambos</i> (6 years)	83.8 [†]	Shanmughavel <i>et al.</i> (2001)
<i>Bambusa bambos</i> (20 years)	12.1	Kumar <i>et al.</i> (2005)
<i>Bambusa oldhamii</i> (8 years)	32.20	This study
<i>Dendrocalamus strictus</i>	15.8-19.3	Tripathi and Singh (1994)
<i>Dendrocalamus strictus</i> (5 years)	24.7	Singh and Singh (1999)
<i>Phyllostachys pubescens</i>	18.1	Isagi <i>et al.</i> (1997)
<i>Sphaerobambos philipinensis</i> (4 years)	31.03	Virtucio <i>et al.</i> (1991)
<i>Bambusa cacharensis</i> + <i>B. vulgaris</i> + <i>B. valcooa</i>	24.3 [*]	Nath <i>et. al</i> (2009)
Other tropical tree species:		
<i>Acacia dealbata</i> (4 years)	20.7	Fujimori and Yamamoto (1967)
<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i> (5-7 years)	9-39	Stape <i>et al.</i> (2004)
<i>Leucaena leucocephala</i> (5 years)	13-55	Parrotta (1992)

[†]Includes belowground biomass ♦ Incluye biomasa subterránea.

^{*}mixed forest, NAPP for the last five culm age classes ♦ bosque mixto, NAPP en las últimas cinco clases de culmos por edad.

biomass removed at the four harvest cycles done in the last four years. In diverse bamboo species, variation in annual production of culms has been identified, which is explained both by density of plantation and intensity of harvest (Raghubanshi, 1994; Singh and Kochhar, 2005). Harvest intensity has implications both on modifying the age structure of remaining foliage (photosynthetically active tissue), and on distribution and translocation of assimilates among culms of different ages.

CONCLUSIONS

Bamboo species, particularly *Bambusa oldhamii*, are fast-growing species, with high productivity, and can be used as a species for plantations in some tropical zones of Mexico either in carbon sequestration or biomass and bio-energy projects. Management of bamboo plantations is essential for increasing or maintaining a desired productivity level, given that the highest proportion of aerial biomass is assigned to young culms. Since production of new culms is associated with the amount of pre-existing culms from earlier cohorts, it is important to consider harvest cycles and intensity levels to maintain an adequate stand density. It is necessary to continue productivity studies in these species and evaluate the effects of different management practices in plantations at different development stages.

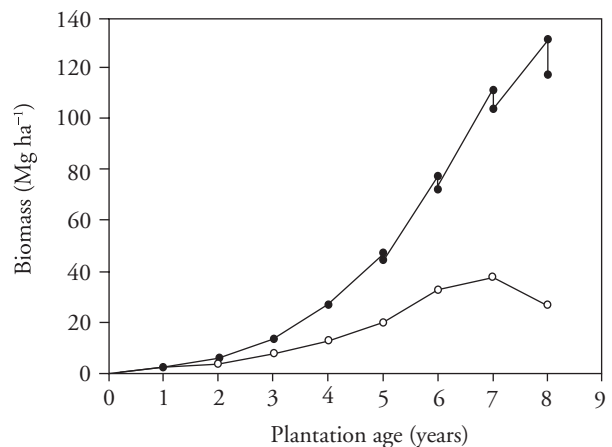


Figure 4. Annual increase in aerial biomass (lower line) and standing accumulated biomass (upper line) in an eight-year-old plantation of *Bambusa oldhamii*.

Figura 4. Aumento anual en la biomasa aérea (línea inferior) y la biomasa acumulada en pie (línea superior) en una plantación de *Bambusa oldhamii* de ocho años de edad.

productividad, y se pueden usar para plantaciones en algunas zonas tropicales de México, ya sea en proyectos de captura de carbono o biomasa y de bio-energía. El manejo de plantaciones de bambú es esencial para aumentar o mantener un nivel de productividad deseado, dado que se asigne una mayor cantidad de biomasa aérea a los culmos jóvenes. Debido a que la

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their thanks to Bambuver A.C., for the facilities and logistic support given for this work. The study was financed by the National Forestry Commission (Comisión Nacional Forestal) through project CONAFOR-2002-C01-6541 within the Sectorial Fund for Forest Research (Fondo Sectorial para la Investigación Forestal).

LITERATURE CITED

- Banik, R. L., and I. S. Nurul. 2005. Leaf dynamics and above ground biomass growth in *Dendrocalamus longispathuz* Kurtz. *J. Bamboo Rattan* 4(2): 143-150.
- Castañeda-Mendoza, A., J. J. Vargas-Hernández, A. Gómez-Guerrero, J. I. Valdez-Hernández, and H. Vaquera-Huerta. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia* 39: 107-116.
- Christanty, L., D. Maily, and J. P. Kimmins. 1996. 'Without bamboo, the land dies': biomass, litterfall, and soil organic matter dynamics of a Javanese bamboo talun-kebun system. *Forest Ecol. Manage.* 87: 75-88.
- Christersson, L., and K. Verma. 2006. Short-rotation forestry - a complement to "conventional" forestry. *Unasylva* 223 (57): 34-39.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, and J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecol. Appl.* 11: 356-370.
- Dagillis, T. D., and D. J. Trucke. 1998. One bamboo stand does not a planet save: bamboo industrialization in the context of sustainable development. *In: VI International Workshop and V International Bamboo Congress. INBAR-FUNBAMBU-IBA, Costa Rica.* p. 143.
- FAO-UNESCO. 1988. Soil map of the world. Revised legend. Report 60. Rome. s/p.
- Fujimori, T., and K. Yamamoto. 1967. Productivity of *Acacia dealbata* stands. *J. Japan. For. Soc.* 49: 143-149.
- Ganapathy, P. M., Z. Huan-Ming, S. S. Zoolagud, D. Turcke, and Z. B. Espiloy. 1999. Bamboo panel boards: a state-of-the-art review. Technical report No. 12. International Network for Bamboo and Rattan. 115 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 246 p.
- Hogarth, N. J., and D. C. Franklin. 2009. Observations on the clonal parentage of culms in wild stands of a clumping bamboo from northern Australia. *J. Trop. For. Sci.* 21(2): 139-146.
- Hunter, I. R., and W. Junqui. 2002. Bamboo biomass. Working paper No. 36. International Network for Bamboo and Rattan. 11 p.
- Isagi, Y., T. Kawahara, K. Kamo, and H. Ito. 1997. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. *Plant Ecol.* 130 (1): 41-52.
- Kleinhenz, V., and D. J. Midmore. 2001. Aspects of bamboo agronomy. *Adv. Agron.* 74: 99-149.
- producción de nuevos culmos se asocia con la cantidad de culmos pre-existentes de cohortes anteriores, es importante considerar los ciclos y niveles de intensidad de cosecha para mantener una adecuada densidad de la plantación. Es necesario continuar estudios de productividad de estas especies y evaluar los efectos de diferentes prácticas de manejo en plantaciones, en diferentes etapas de desarrollo.
- Fin de la versión en español—
- *—
- Krishnankutty, C. N., and M. Chundamanil. 2005. Predicting the weight of a bamboo clump: commercial weight tables for *Bambusa bambos*. *J. Bamboo Rattan* 4 (4): 311-316.
- Kumar, B. M., G. Rajesh, and K. G. Sudheesh. 2005. Aboveground biomass production and nutrient uptake of thorny bamboo (*Bambusa bambos* (L.) Voss) in the homegardens of Thrissur, Kerala. *J. Trop. Agric.* 43: 51-56.
- Lakshamana, 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. Technical Document. Forspa Publication. No. 6; Thailand. pp: 100-103.
- Li, X. B., T. F. Shupe, G. F. Peter, C. Y. Hse, and T. L. Eberhardt. 2007. Chemical changes with maturation of the bamboo species *Phyllostachys pubescens* stand. *J. Trop. For. Sci.* 19 (1): 6-12.
- Liese, W. 1998. The anatomy of bamboo culms. International Network for Bamboo and Rattan. INBAR Technical Report No. 18. Beijing, China. 205 p.
- Lobovikov, M., Y. Lou, D. Schoene, and R. Widenoja. 2009. The poor man's carbon sink. Bamboo in climate change and poverty alleviation. FAO-INBAR. Non-wood Forest Products working document no. 8, 52 p.
- Nath, A. J., and A. K. Das. 2011. Carbon storage and sequestration in bamboo-based smallholder homegardens of Barak Valley, Assam. *Curr. Sci.* 100(2): 229-233.
- Nath, A. J., G. Das, and A. K. Das. 2009. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. *Biomass Bioenerg.* 33: 1188-1196.
- Parrotta, J. A. 1992. *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. Leucaena, tantan. USDA, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 8 p.
- Raghubanshi, A. S. 1994. Effect of bamboo harvest on dynamics of nutrient pools, N mineralization, and microbial biomass in soil. *Biol. Fert. Soils* 18: 137-142.
- Shanmughavel, P., R. S. Peddappaiah, and T. Muthukumar. 2001. Biomass production in an age series of *Bambusa bambos* plantations. *Biomass Bioenerg.* 20: 113-117.
- Singh, A. N., and J. S. Singh. 1999. Biomass, net primary production and impact of a bamboo plantation on soil redevelopment in a dry tropical region. *For. Ecol. Manage.* 119: 195-207.

- Singh, K. A., and S. K. Kochhar. 2005. Effect of clump density/spacing on the productivity and nutrient uptake in *Bambusa pallida* and the changes in soil properties. *J. Bamboo Rattan* 4 (4): 323-334.
- Skovsgaard, J. P., and J. K. Vanclay. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81: 12-31.
- Stape, J. L., D. Binkley, and M. G. Ryan. 2004. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecol. Manag.* 193: 17-31.
- Taylor, A. H., and Q. Zisheng. 1987. Culm dynamics and dry matter production of bamboos in the Wolong and Tangjiahe giant panda reserves, Sichuan, China. *J. Appl. Ecol.* 24: 419-433.
- Tiarks, A., E. K. S. Nambiar, and C. Cossalter. 1988. Site management and productivity in tropical forest plantations. Center for International Forestry Research. Occasional paper No. 16. Jakarta. 11 p.
- Tripathi, S. K., and K. P. Singh. 1994. Productivity and nutrient cycling in recently harvested and mature bamboo savannas in the dry tropics. *J. Appl. Ecol.* 31: 109-124.
- Upadhyaya, K., A. Arunachalam, K. Arunachalam, and A. K. Das. 2008. Aboveground biomass and productivity appraisal of four important bamboo species growing along different altitudinal regimes in Arunachal Pradesh. *J. Bamboo Rattan* 7: 219-234.
- Virtucio, F. D., B. M. Manipula, and F. M. Schlegel. 1991. Culm yield and biomass productivity of laak (*Sphaerobambos philippinensis*). *In: Proceedings of the 4th International Bamboo Workshop on Bamboo in Asia and the Pacific*. Chiangmai, Thailand. Technical Document. Forspa Publication. No. 6; November 27-30. pp: 95-99.
- Wahab, R., M. Mustapa, O. Sulaiman, A. Mohamed, A. Hassan, and I. Khalid. 2010. Anatomical and physical properties of cultivated two- and four-year-old *Bambusa vulgaris*. *Sains Malaysiana* 39(4): 571-579.
- Waring, R. H., J. J. Landsberg, and M. Williams. 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiol.* 18: 129-134.