

# Biomasa y Carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica

Para cuantificar la cantidad de carbono que se logra eliminar de la atmósfera mediante el establecimiento de plantaciones, es fundamental contar con las herramientas adecuadas, como los modelos para la cuantificación de biomasa.

Marcelino Montero M.  
Markku Kanninen

## Resumen

El estudio se desarrolló en un ensayo de espaciamientos con diseño estadístico completamente al azar con tres repeticiones y tres tratamientos: 2 m x 2 m (2.500 árboles/ha), 2,5 m x 2,5 m (1.600 árboles/ha) y 3 m x 3 m (1.111 árboles/ha). El sitio se ubica en Mogos, Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica.

Los resultados obtenidos a los diez años de edad indican diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Estas diferencias sugieren que la densidad de 1.600 árboles/ha es la más recomendable para maximizar el crecimiento diamétrico y la altura total, y alcanzar una mayor productividad en volumen de *Terminalia amazonia*.

En cuanto a gravedad específica de la madera, *T. amazonia* mostró resultados coincidentes con los reportados en la literatura (0,70 g/cm<sup>3</sup>). El factor de expansión de biomasa (FEB) para esta plantación fue similar a los reportados para el bosque natural. El valor para calcular la biomasa por árbol es de FEB = 1,3, y por hectárea es de FEB = 1,2. Los modelos alométricos ajustados para predecir la biomasa de los diferentes componentes del árbol en función del dap presentaron un ajuste satisfactorio; en promedio los coeficientes de determinación explican un 93% de la variabilidad de los datos.

La fracción de carbono determinada para los componentes del árbol de *T. amazonia* y los diferentes espaciamientos no mostraron una variación significativa; el promedio para fustes, ramas y hojas fue de 0,48, 0,43 y 0,42, respectivamente.

La biomasa aérea seca total de cada componente del árbol difiere en el espaciamiento 3 m x 3 m. La mayor producción de biomasa seca se dio en la densidad de 1.600 árboles/ha.

El carbono almacenado en los distintos componentes del árbol a los diez años de edad sugiere que *T. amazonia* muestra un mejor desempeño para almacenar carbono en el espaciamiento 2,5 m x 2,5 m (1.600 árboles/ha), ya que almacena una tasa de carbono de 4,9 Mg/ha/año.

**Palabras claves:** Espaciamientos, modelos alométricos, factor de expansión de biomasa, gravedad específica, fracción de carbono.

## Abstract

**Biomass and carbon in *Terminalia amazonia* plantations in the South of Costa Rica.** The study was carried out in a spacing trial with an experimental design consisting of randomized complete blocks, with three treatments and three replicates. Treatments were 2 m x 2 m (2500 trees/ha), 2.5 m x 2.5 m (1.600 trees/ha) and 3 m x 3 m (1111 trees/ha). The trial is located in Mogos, Osa Peninsula, Puntarenas, Costa Rica.

Results at 10 years of age indicate significant differences between treatments. These differences suggest that the stand density of 1600 trees/ha is the best option to maximize diameter growth and total height, as well as a greater yield of *Terminalia amazonia*.

Results of wood density found in this study are similar to those reported in the literature (0.70 g/cm<sup>3</sup>). The biomass expansion factor (BEF) for this plantation is similar to that reported for natural forests. The factor to calculate the BEF for an individual tree is 1.3, and 1.2 per hectare. The allometric models adjusted for predicting biomass on the different tree components in relation to dbh had a satisfactory adjustment. The determination coefficients explained an average of 93% of data variability.

The carbon fraction determined for the tree components of *T. amazonia*, as well as the different spacings, did not show a significant variation. The average values for stem, branches and foliage were 0.48, 0.43, and 0.42, respectively.

The aboveground biomass per tree component under the 3 m x 3 m spacing differed from the other two treatments. Dry biomass production was greater at 1600 trees/ha density.

The carbon stored by different tree components at the age of 10 years suggests that *T. amazonia* stores carbon in a more efficient manner under the 2.5 m x 2.5 m spacing (1600 trees/ha), with a rate of 4.9 Mg/ha/year.

**Key words:** Spacing, allometric models, biomass expansion factor, specific gravity, carbon fraction.

Las plantaciones forestales, por la gran cantidad de biomasa que producen por unidad de área, fijan anualmente mucho  $\text{CO}_2$  y por ende contribuyen a la “limpieza de la atmósfera”. El carbono fijado en la biomasa permanece acumulado en las plantaciones por largos períodos. La función de las plantaciones como elemento mitigador de los gases de efecto invernadero es reconocida en la actualidad por la comunidad nacional e internacional. Por ello, en Costa Rica se han establecido mecanismos para financiar el pago por los servicios ambientales que prestan las plantaciones forestales existentes en el país (MIDEPLAN 2002).

Costa Rica ha asumido un papel de liderazgo en esta materia con el fin de garantizarse una fuente importante de recursos para sus políticas de desarrollo sostenible a largo plazo. Mediante este mecanismo, los países que deben alcanzar determinadas metas en términos de reducción de sus emisiones pueden comprar el servicio a otros países, sin tener que reducir completamente la cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$  que les corresponde -lo cual sería más oneroso- como una medida adicional a la transformación industrial (MIDEPLAN 2002).

El uso de especies nativas para plantaciones fijadoras de carbono pasa por una selección adecuada de la especie y el sitio. *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell Jawa es una especie con gran potencial de crecimiento en colinas y planicies costeras, en suelos rojos o amarillos, lateríticos profundos, derivados de materiales aluviales o ígneos (Nichols y González 1992, Flores 1994, CATIE 1997). Además, la especie se desarrolla bien en condiciones de bosque húmedo Premontano, bosque húmedo Tropical y bosque muy húmedo Tropical, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1982); en elevaciones que van desde el nivel del mar hasta los 1.100 m, con temperaturas anuales entre 21 a 24°C y precipitaciones anuales entre 2.000 y 4.500 mm por año. Esta especie soporta hasta cuatro meses de sequía (OTS 1991, citado por Prado 1991, Nichols 1994).

*T. amazonia* es una de las especies más utilizadas en los programas de reforestación con especies nativas incentivados por el Gobierno de Costa Rica. La superficie reforestada con esta especie en la zona norte del país es de 172 ha y 1.097 ha en la zona sur (ITCR 1999).

Para cuantificar la cantidad de carbono que se logra eliminar de la atmósfera mediante el establecimiento de plantaciones es fundamental contar con herramientas adecuadas, como los modelos para la cuantificación de biomasa, los cuales permiten estimar con relativa precisión la biomasa de cada componente del árbol. Otras herramientas son el muestreo y análisis en laboratorio para determinar la fracción de carbono para la especie. La cuantificación física de biomasa (técnica destructiva) consume mucho tiempo, especialmente en la medición de ciertos componentes como el follaje y las ramas; por eso se justifica el desarrollo de métodos indirectos (generación de modelos) para estimar la biomasa (Pérez y Kanninen 2002).

Este estudio se fundamenta en la hipótesis de que existe una correlación entre el diámetro a 1,3 m de altura y la altura total del árbol con la biomasa de los diferentes componentes. Por lo anterior, mediante el ajuste de modelos

alométricos se estima la biomasa seca aérea de los diferentes componentes del árbol (follaje, ramas, fuste y total) como una técnica no destructiva. También se determinan algunas características de la madera como la densidad específica y la fracción de carbono, las cuales se utilizan para calcular el total almacenado por componente y por hectárea para diferentes espaciamientos o densidades de siembra.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se desarrolló en un ensayo de espaciamientos con diseño estadístico, ubicado en Mogos, Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica (Figura 1), a una elevación de 260 msnm, en la zona de vida bosque muy húmedo Tropical (Holdridge 1982), con una precipitación media anual de 4.686 mm, topografía ondulada, pendiente promedio de 13% y suelo arcilloso con un  $\text{pH} = 5,1$  y bajo en potasio, fósforo y zinc.



Figura 1. Ubicación del ensayo de espaciamientos de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica.

El ensayo de espaciamientos (densidades de siembra) se estableció con un diseño estadístico completamente al azar con tres repeticiones y tres tratamientos. Estos consisten en diferentes espaciamientos entre árboles: 2 m x 2 m (2.500 árboles/ha), 2,5 m x 2,5 m (1.600 árboles/ha) y 3 m x 3 m (1.111 árboles/ha), con diferente número de árboles por parcela (104,45 y 40, respectivamente) y diferente área (414 m<sup>2</sup>, 338 m<sup>2</sup> y 360 m<sup>2</sup>).

En el ensayo se evaluaron dos variables: el diámetro (dap) a 1,3 m de altura y la altura total (H) de todos los árboles a la edad de diez años; a esa misma edad se aplicó un raleo del 50% de los árboles originales en todo el ensayo. De los árboles raleados, se seleccionaron 35 distribuidos aproximadamente por clase diamétrica para cubicar los fustes y cuantificar las hojas y las ramas. A estos árboles se les midió el diámetro del fuste desde la base y a cada 2 m de longitud y se pesaron las ramas y las hojas. De los diferentes componentes del árbol (fuste, ramas y hojas) se co-

lectaron muestras para determinar en el laboratorio el peso seco y la gravedad específica (GE) de la madera.

Para la determinación del peso seco de cada componente se colectaron muestras de 1 kg para ramas y 0,5 kg para follaje y una pieza en corte transversal del fuste a 1,3 m de altura, en cada tratamiento y repetición. Estas muestras se secaron al horno por 48 horas a 105°C. La determinación de la GE se realizó sumergiendo muestras de madera de 2 cm x 4 cm x 12 cm en una probeta con agua, luego se midió el volumen de agua desplazada por cada muestra y se dividió el peso seco al horno (g) entre el volumen de agua desplazada (cm<sup>3</sup>), de acuerdo con las normas de ASTM (1986).

El volumen del fuste se calculó con la fórmula de Smalian (Loetsch y Haller 1973); el peso de biomasa seca se determinó multiplicando el volumen por la GE.

El factor de expansión de biomasa (FEB) se calculó dividiendo la biomasa aérea seca total entre la biomasa seca del fuste. El valor obtenido se multiplicó por el volumen y la gravedad específica de la madera para estimar la biomasa seca del fuste (Segura y Kanninen 2002).

Para determinar la fracción de carbono (FC) se colectaron tres muestras de ramas, hojas y madera de la base del árbol a 10 cm de altura, por tratamiento y repetición. Los análisis se realizaron en el laboratorio mediante el método de calorimetría (Eduarte y Segura 1999).

Para los análisis de varianza (ANOVA) se usó el Programa SYSTAT 10, se utilizó el total de árboles existentes y medidos en todos los tratamientos y repeticiones (n = 594), analizando el dap, la H y el volumen por hectárea a los diez años de edad.

Las regresiones lineales usadas en la determinación de la relación dap/H con respecto a los componentes de la biomasa del árbol fueron realizadas con el programa estadístico SYSTAT 10. Los modelos se seleccionaron mediante la creación de gráficos, analizando el comportamiento de los valores calculados por el modelo frente a los observados y comprobados estadísticamente mediante el mayor valor del coeficiente de determinación ajustado (r<sup>2</sup> ajustado) de cada modelo y el cuadrado medio del error (CME) (Parresol 1999). Además, se consideró que los parámetros de cada modelo fueran significativos estadísticamente.

La estimación de la biomasa seca del fuste, ramas, follaje y total por hectárea de cada tratamiento o densidad de siembra se calculó con los modelos alométricos desarrollados.

La cantidad de carbono almacenado por hectárea por cada componente del árbol y el total se obtuvo multiplicando la biomasa por el valor de la fracción de carbono obtenido en el análisis de laboratorio.

## Resultados y discusión

En el cuadro 1 se presentan los promedios por tratamiento de los resultados obtenidos en el ensayo de espaciamientos a los diez años de edad sin intervención silvicultural. A las variables dap, H y volumen por hectárea se les aplicó el análisis de varianza (ANOVA) frente a tratamientos y repeticiones para observar las diferencias. Los resultados obtenidos fueron muy similares para todas las variables; se presentan detalles para dos de estas.

Los análisis de varianza del dap y la altura no mostraron diferencias estadísticas significativas entre repeticiones, pero sí entre tratamientos (Figura 2). El tratamiento 2 m x 2 m presentó diferencias estadísticas altamente significativas en dap y significativas en altura con una confiabilidad del 99% (P<0,01) y 95% (P<0,05), en relación con los otros dos tratamientos.

En términos de diámetro, y de acuerdo con el análisis de varianza, el mejor tratamiento fue el de 3 m x 3 m; sin embargo, en altura total se iguala con el de 2,5 m x 2,5 m (Figura 2). Si lo que se busca en un sistema de producción forestal es madera para aserrío, la maximización del diámetro para esta especie se lograría con cualquiera de los dos tratamientos, ya que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. En términos de productividad, lo más recomendable sería plantar 1.600 árboles/ha, que es el tratamiento donde se concentra el mayor volumen por hectárea en el fuste y menos en las ramas, contrariamente a lo que se obtendría con 1.111 árboles/ha (Cuadro 1).

La determinación de la gravedad específica por tratamiento no mostró diferencias entre tratamientos, por lo que, el valor utilizado para transformar el volumen a peso seco del fuste en promedio fue de 0,70 g/cm<sup>3</sup>. Este resultado es similar al reportado para esta especie en la literatura (Paz y Corral 1980, González 1991, Flores 1994).

En el cuadro 2 se presentan los datos de la cuantificación de biomasa aérea seca utilizados en la construcción de modelos para predecir la biomasa aérea de cada parte de los árboles de *T. amazonia*. Además, se calculó el factor de expansión de biomasa (FEB), el cual no mostró relación con ninguna variable que permitiera la construcción de un modelo de predicción del mismo.

Un método para calcular la biomasa seca aérea total por hectárea o por árbol consiste en utilizar el FEB, siempre y cuando se cuente con datos de volumen y gravedad específica de la madera (Segura y Kanninen 2002). Para *T. amazonia*, el FEB promedio es de 1,3 y puede ser utilizado para calcular la biomasa total por árbol, siempre y cuando los datos de los árboles se encuentren en el ámbito de valores (Cuadro 2) fuera de este rango no es recomendable usar ese promedio.

**Cuadro 1.** Promedios de crecimiento de *Terminalia amazonia* a 10 años de edad en un ensayo de espaciamientos en la Zona Sur de Costa Rica.

Tratamiento (m)	Supervivencia (%)	dap (cm)	IMAdap (cm)	H (m)	IMAH (m)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	Vol. (m <sup>3</sup> /ha)	IMAVol (m <sup>3</sup> /ha/año)
2 X 2	86	10,3	1	11,8	1,1	17,7	110,1	10,5
2,5 X 2,5	89	12,2	1,2	13,2	1,3	16,5	115,6	11
3 X 3	94	12,7	1,2	13,3	1,3	13,3	94,8	9

dap: diámetro a 1,3 m de altura IMA: incremento medio anual H: altura AB: área basal Vol.: volumen

Con la base de datos del cuadro 2 (n = 35), se ajustó una serie de modelos alométricos para predecir la biomasa seca de las diferentes partes del árbol. Los modelos que mostraron mejor ajuste fueron los que se correlacionaron con la variable dap. Los modelos de mejor ajuste se seleccionaron considerando el coeficiente de determinación ajustado ( $r^2$  ajustado), el cuadrado medio del error (CME) de cada modelo y que los parámetros de cada modelo fueran significativos estadísticamente con una probabilidad del 95% ( $P < 0,05$ ).

Sprugel (1983) indica que todos los modelos alométricos con transformaciones logarítmicas deben ser corregidos por un factor de corrección (FC), por lo que el resultado obtenido al usar cualquiera de estos modelos debe ser multiplicado por el FC de cada uno.

Los modelos con mejor ajuste fueron:

- Biomasa del fuste =  $\text{Exp} [ - 1,602 + 2,299 * \ln (\text{dap}) ]$**  FC = 1,015  
 $r^2 = 0,99$   $r^2$  ajustado = 0,95 CME = 0,029
- Biomasa de ramas =  $\text{Exp} [ - 5,526 + 3,026 * \ln (\text{dap}) ]$**  FC = 1,191  
 $r^2 = 0,95$   $r^2$  ajustado = 0,73 CME = 0,349
- Biomasa de hojas =  $\text{Exp} [ - 7,928 + 3,451 * \ln (\text{dap}) ]$**  FC = 1,408  
 $r^2 = 0,77$   $r^2$  ajustado = 0,64 CME = 0,684
- Biomasa aérea total =  $\text{Exp} [ - 1,648 + 2,392 * \ln (\text{dap}) ]$**  FC = 1,013  
 $r^2 = 0,99$   $r^2$  ajustado = 0,96 CME = 0,025

**Donde**

- In: logaritmo natural
- dap: diámetro a 1,3 m de altura
- $r^2$ : coeficiente de determinación
- $r^2$  ajustado: coeficiente de determinación ajustado
- CME: cuadrado medio del error
- FC: factor de corrección

El ajuste de estos modelos con los datos observados se presenta en la figura 3 (a,b,c y d). El dap fue la variable mejor correlacionada con la biomasa seca de las diferentes partes del árbol. El fuste mostró un  $r = 0,97$ , las ramas  $r = 0,81$ , las hojas  $r = 0,72$  y la biomasa seca aérea total presentó un  $r = 0,98$ . Esta correlación es bastante alta y similar a la obtenida en la relación con los modelos generados para diferentes especies en condiciones de bosque natural en el trópico y plantaciones (Brown *et al.* 1989, Brown e Iverson 1992, Pérez y Kanninen 2002).

Es una ventaja que los modelos consideren solo la variable dap, ya que los inventarios de plantaciones o bosques naturales siempre consideran esta variable por su facilidad de medición en el campo.

Con estos modelos se calculó la biomasa total de todos los árboles del ensayo. En el cuadro 3 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos de la biomasa aérea seca de cada componente del árbol y total acumulada por hectárea y por tratamiento, el cálculo del FEB por hectárea, el valor obtenido de la fracción de carbono y el carbono almacenado para las tres densidades de plantación a los diez años de edad, sin intervenciones silviculturales. Estos resultados se obtienen con una mortalidad natural promedio del 10% para las tres densidades de siembra a los diez años de edad.

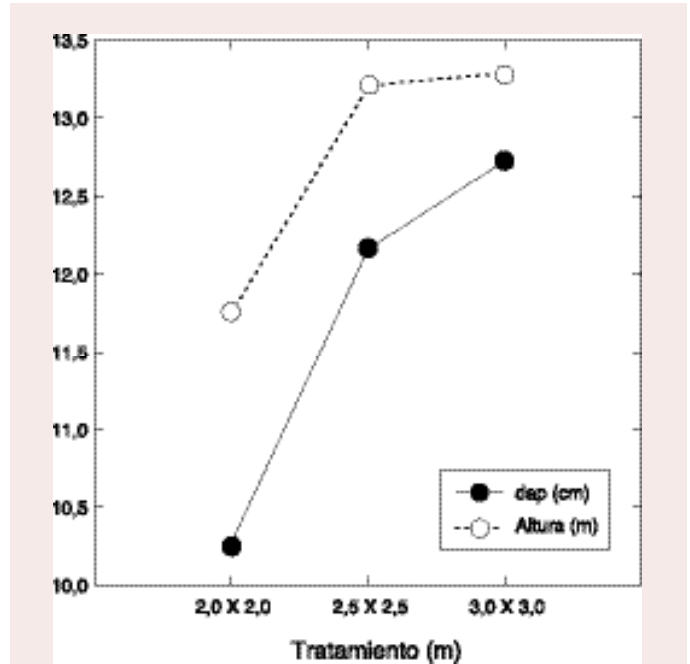


Figura 2. Diferencias entre los tratamientos en dap y altura de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica.

**Cuadro 2.** Base de datos utilizada para la construcción de modelos de predicción de biomasa seca aérea total de *Terminalia amazonia* por componente del árbol.

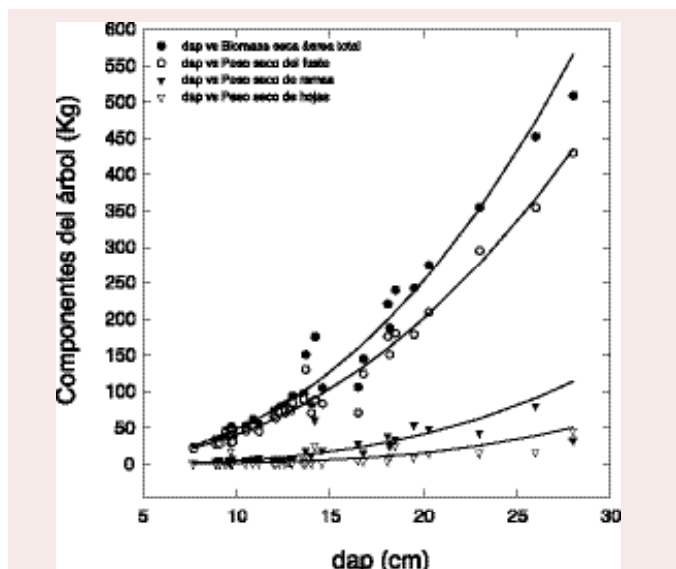
Árbol (#)	dap (cm)	H (m)	Biomasa seca (kg)				FEB
			Fuste	Ramas	Hojas	Aérea total	
1	7,7	12,4	21,4	1,5	0,3	23,2	1,1
2	8,9	10,7	28,1	4,6	0,7	33,5	1,2
3	9,1	13,7	28,3	5,6	0,2	34,1	1,2
4	9,4	14,8	43,2	1,9	0,7	45,8	1,1
5	9,6	11,3	39,1	5,8	3,0	47,8	1,2
6	9,7	12,7	37,5	0,8	0,8	39,1	1,0
7	9,7	13,8	29,4	4,7	18,4	52,2	1,8
8	9,8	12,1	30,4	8,1	0,3	38,8	1,3
9	9,8	14,3	46,5	2,5	0,9	49,8	1,1
10	10,5	13,7	45,4	6,4	1,1	53,0	1,2
11	10,9	13,7	51,6	8,1	1,6	61,4	1,2
12	11,2	13,2	44,9	8,4	1,7	55,0	1,2
13	12,0	14,7	66,8	4,6	1,6	73,0	1,1
14	12,1	15,2	63,7	7,2	1,4	72,3	1,1
15	12,3	16,0	71,7	5,6	1,3	78,6	1,1
16	12,6	14,7	70,6	6,0	1,7	78,3	1,1
17	12,6	14,8	74,3	5,0	2,4	81,7	1,1
18	12,8	19,3	76,5	4,7	2,4	83,5	1,1
19	12,9	15,7	74,1	7,7	2,7	84,6	1,1
20	13,0	15,8	84,8	6,8	2,2	93,8	1,1
21	13,6	17,7	89,5	5,4	2,0	96,9	1,1
22	13,7	14,6	130,3	19,3	1,6	151,1	1,2
23	14,0	13,7	70,6	12,2	1,2	83,9	1,2
24	14,2	19,0	88,7	61,1	25,6	175,4	2,0
25	14,6	15,0	83,4	19,4	2,3	105,1	1,3
26	16,5	16,9	70,7	29,6	5,9	106,2	1,5
27	16,8	16,0	124,6	15,9	4,4	144,9	1,2
28	18,1	17,5	175,9	39,5	5,1	220,6	1,3
29	18,2	16,7	150,9	25,7	11,0	187,4	1,2
30	18,5	20,8	180,4	34,3	25,2	239,9	1,3
31	19,5	17,2	178,5	54,6	9,7	242,8	1,4
32	20,3	19,9	209,6	49,4	15,4	274,4	1,3
33	23,0	23,0	295,1	43,6	15,8	354,5	1,2
34	26,0	21,6	354,6	80,8	16,7	452,1	1,3
35	28,0	20,8	429,7	33,0	45,9	508,6	1,2

dap: diámetro a 1,3 m de altura H: altura total FEB: factor de expansión de biomasa

**Cuadro 3.** Biomasa aérea por componente del árbol, FEB y carbono almacenado para las diferentes densidades de siembra de *Terminalia amazonia* de 10 años de edad en la zona Sur, Costa Rica.

Tratamiento	Biomasa (Mg/ha)				FEB	Fracción Carbono			Carbono almacenado (Mg/ha)			
	Fuste	Ramas	Hojas	Aérea total		Fuste	Ramas	Hojas	Fuste	Ramas	Hojas	Total
2 x 2	84,7	12,4	3,1	101,6	1,2	0,49	0,40	0,42	41,5	5	1,3	47,8
2,5 x 2,5	87,0	15,1	4,0	106,7	1,2	0,47	0,45	0,41	40,9	6,8	1,6	49,3
3 x 3	67,3	11,8	3,2	82,8	1,2	0,48	0,44	0,42	32,3	5,2	1,3	38,8

Mg : 1 tonelada; ha: hectárea FEB: Factor de Expansión de Biomasa



**Figura 3.** Relación entre los datos observados y los predichos con los modelos ajustados para peso seco del fuste, ramas, hojas y biomasa total por árbol de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica.

La biomasa aérea seca total obtenida para cada componente del árbol en el tratamiento 3 m x 3 m difiere de los otros dos tratamientos (Cuadro 3). Resultados reportados por Shepherd (1998) sobre la biomasa de *T. amazonia* difieren de lo encontrado en esta investigación, al igual que el carbono almacenado. Esta diferencia puede deberse a que el muestreo realizado por Shepherd fue poco representativo para extrapolar a hectáreas; además, él calcula que el 50% del árbol es carbono, también se debe considerar la época de muestreo y la condición de plantación mixta a monoespecífica.

Montagnini y Porras (1998) y Shepherd y Montagnini (2001) reportan que *T. amazonia* en la zona Atlántica de Costa Rica, a tres y seis años de edad, presenta un incremento medio anual en biomasa total de 10,8 y 13,2 Mg/ha respectivamente, en una plantación de 2.500 árboles/ha. Dichos resultados son muy similares a los obtenidos en esta investigación (10,2 Mg/ha/año) con la misma densidad de siembra, aunque en una zona diferente. Esto indica que la productividad de *T. amazonia* no se ve afectada por la zona en que se plante, siempre y cuando la misma se encuentre dentro del rango aceptable para la especie.

Ola-Adams (1993), en un ensayo similar a este, encontró que la biomasa total (fuste, corteza y raíces pequeñas) de *Terminalia superba* decrece al aumentar el espaciamiento. En este estudio se encontró que la biomasa de *T. amazonia*

se incrementó en el espaciamiento de 2,5 m x 2,5 m, pero en un espaciamiento mayor, la biomasa disminuye (Cuadro 3).

En el caso del FEB, se observó que este factor no es influenciado por la densidad de siembra y que no difiere mucho del valor obtenido para el cálculo de la biomasa por árbol (FEB = 1,3), mientras que el valor del FEB para el cálculo por hectárea fue de 1,2 (Cuadro 3). Aunque la diferencia fue mínima, es conveniente emplear el factor correspondiente para calcular por árbol o por hectárea. La densidad de siembra de la plantación no influye en el FEB por hectárea. Estos factores se encuentran en el rango de lo reportado para varias especies en la literatura para bosque natural (Brown y Lugo 1984, Segura *et al.* 2000).

La fracción de carbono (FC) tampoco presentó gran variación entre tratamientos para las mismas partes del árbol (Cuadro 3). Estos valores se encuentran en el rango de lo reportado para otras especies de bosque natural (Segura 1997 y 1999, Soliz 1998, Andrade 1999, Kort y Turnock 1999). En fuste y hojas no hay diferencia entre tratamientos, mientras que el valor obtenido para las ramas en el espaciamiento 2 m x 2 m difiere levemente de los otros dos espaciamientos (Cuadro 3).

En términos de carbono almacenado en el fuste, el tratamiento 3 m x 3 m presenta 8,6 Mg/ha menos que los otros tratamientos. El mayor almacenaje se da en el espaciamiento 2,5 m x 2,5 m, pero no difiere mucho del 2 m x 2 m (Cuadro 3). El tratamiento 2,5 m x 2,5 m almacena más carbono en las hojas que los otros dos tratamientos (Cuadro 3). Esta diferencia puede deberse a que este tratamiento tuvo una mejor conformación de copa y, por ende, un mayor contenido de follaje.

En cuanto al carbono total, el tratamiento 2,5 m x 2,5 m fue el que más carbono acumulado mostró, con una diferencia de 1,5 Mg/ha con respecto al tratamiento 2 m x 2 m y de 10,5 Mg/ha con respecto al 3 m x 3 m. Los resultados que se muestran en el Cuadro 3, en cuanto al carbono almacenado en los distintos componentes del árbol, sugieren que *T. amazonia* a los diez años de edad muestra un mejor desempeño para almacenar carbono en el espaciamiento 2,5 x 2,5 m (1600 árboles/ha), pues almacena una tasa de carbono de 4,9 Mg/ha/año.

### Conclusiones

El análisis de varianza no mostró diferencias estadísticas entre repeticiones pero sí entre tratamientos. Las diferencias encontradas sugieren que la densidad de 1.600 árboles/ha es la más recomendable para maximizar el crecimiento en diámetro y en altura total y la productividad en volumen de *T. amazonia*.

Los resultados obtenidos en cuanto a la gravedad específica de la madera de *T. amazonia* son coincidentes con los reportados en la literatura ( $0,70 \text{ g/cm}^3$ ). Asimismo, el FEB encontrado en esta condición de plantación es muy similar a lo reportado en investigaciones de bosque natural. El valor para calcular la biomasa por árbol es  $\text{FEB} = 1,3$ , y por hectárea  $\text{FEB} = 1,2$ .

Los modelos alométricos ajustados para predecir la biomasa de los diferentes componentes del árbol en función del dap, al compararlos con los datos observados, presentan buen ajuste. En promedio, los coeficientes de determinación explican un 93% de la variabilidad de los datos; sin embargo, a pesar de esta precisión, estos modelos deben ser utilizados dentro del ámbito de datos con los que fueron generados.

Los valores de la fracción de carbono entre los componentes del árbol y las diferentes densidades de siembra no muestran variación significativa. Los promedios para fuste, ramas y hojas fueron de 0,47, 0,43 y 0,42, valores que se encuentran dentro del rango reportado en la literatura.

La biomasa aérea seca total de cada componente del árbol, y específicamente del tratamiento  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , difiere considerablemente de los otros dos tratamientos. La mayor producción de biomasa seca se encuentra en la densidad de 1.600 árboles/ha.

El carbono almacenado en los distintos componentes del árbol a los diez años de edad sugiere que *T. amazonia* muestra un mejor desempeño para almacenar carbono en el espaciamiento  $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$  (1.600 árboles/ha), pues almacena una tasa de carbono de  $4,9 \text{ Mg/ha/año}$ .

**Agradecimientos:** Los autores expresan un sincero agradecimiento a la Academia de Finlandia por el financiamiento del presente trabajo; al Sr. Hugo Brenes, propietario de la finca, por darnos las facilidades para realizar la investigación; a MSc. Luis Diego Pérez C., MSc. Edgar Víquez, MSc. Milena Segura, Ing. Álvaro Vallejo, MSc. Oscar Vallejos y a la Dra. Florencia Montagnini por sus aportes en el trabajo de campo, así como en la revisión del documento.

Marcelino Montero M.  
Investigador Forestal en Dinámica de Plantaciones,  
Consultor.  
Universidad de Helsinki, Finlandia/CATIE  
Correo electrónico: mmontero@catie.ac.cr

Markku Kanninen  
Director de Servicios Ambientales y  
Uso Sostenible del Programa Forestal  
Centro Internacional de Investigación Forestal (CIFOR)  
Correo electrónico: m.kanninen@cgiar.org

## Literatura citada

- Andrade, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- ASTM. 1986. Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-base Materials. 2395-83, pp. 353-359.
- Brown, S.; Lugo, A.E. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science* 223:1290-1293.
- Brown, S.; Gillespie, A.J.R.; Lugo, A.E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35 (4):381-902.
- Brown, S.; Iverson, L.R. 1992. Biomass estimates for tropical forests. *World Resource Review* 4 (3) 366-383.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 1997. *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell. Nota técnica sobre manejo de semillas forestales No. 10. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 2 p.
- Eduarte, E.; Segura, M.A. 1999. Determinación de carbono utilizando la calorimetría. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. *Ciencias Ambientales* 15:54-55.
- Flores, E. 1994. Roble coral. Árboles y semillas del Neotrópico. San José, Costa Rica. 3 (1):55 - 86.
- González, D.E. 1991. Descripción anatómica de once especies forestales de uso industrial en Panamá. CATIE - INRENARE, Panamá. Proyecto de Árboles de Uso Múltiple. Serie Técnica. Informe Interno. 61 p.
- Holdridge, L.R. 1982. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216 p.
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1999. Centro de Investigación en Integración Bosque - Industria. Disponibilidad de materia prima de las plantaciones forestales de la Región Pacífico Sur. Cartago, Costa Rica, ITCR. Proyecto REDES. 176 p.
- Kort, J.; Turnock, R. 1999. Carbon reservoir and biomass in Canadian prairie shelterbelts. *Agroforestry Systems* 44:175-186 p.
- Loetsch, F.; Haller, K.E. 1973. Forest inventory. Volume I. Statistics of Forest Inventory and Information from Aerial Photographs. Munchen, BLV Verlagsgesellschaft. 436 p.
- Ministerio de Planificación, C.R. 2002. Plan Nacional de Desarrollo. Fijación de Carbono. <http://www.mideplan.go.cr/pnd/plan/19982002/economico/servicio-ambientales/index3.html>. Consultado 22 de mayo 2002.
- Montagnini, F.; Porras, C. 1998. Evaluating Role of Plantations as Carbon Sinks: An Example of an Integrative Approach from the Humid Tropics. *Environmental Management* 22 (3):459-470.
- Nichols, D. 1994. *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell: development of native species for reforestation and agroforestry. *Commonwealth Forestry Review* (England) 73 (1):9-13.
- Nichols, D.; González, E. 1992. Especies nativas y exóticas para la reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. San José, Costa Rica. 84 p.
- Ola-Adams, B.A. 1993. Effects of spacing on biomass distribution and nutrient content of *Tectona grandis* Linn. f. (teak) and *Terminalia superba* Engl. & Diels. (afara) in south-western Nigeria. *Forest Ecology and Management* 58 (299-319).
- Parresol, B.R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45 (4):573-593.
- Paz, P.O.C.; Corral, L.G. 1980. Estudio anatómico de la madera de once especies de angiospermas. México, Subsecretaría Forestal y de la Fauna, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín técnico No 64. 79 p.
- Pérez, C.L.D.; Kanninen, M. 2002. Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. 165:1-3. Son estos los números de número y páginas???
- Prado, R. 1991. Proyecto de reforestación para pequeños y medianos agricultores de la Región Brunca. San Isidro del General, Costa Rica, Dirección General Forestal. pp. 19-20.
- Segura, M.M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis*, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. 147 p.
- Segura, M.M. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 115 p.
- Segura, M.M.; Kanninen, M.; Alfaro, M.; Campos, J.J. 2000. Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana* 30:23-28.
- Segura, M.M.; Kanninen, M. 2002. Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales. In *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Orozco, L.; Brumer, C. (Eds.) Turrialba, Costa Rica, CATIE. Serie Técnica. Manual Técnico No 50, pp. 173-212.
- Shepherd, D. 1998. Mixed-Species tree plantations in the humid tropics: an alternative for carbon sequestration. *Tri News*, Spring 1998. 14-17.
- Shepherd, D.; Montagnini, F. 2001. Above ground carbon sequestration potential in mixed and pure tree plantations in the humid tropics. *Journal of Tropical Forest Science* 13 (3):450-459.
- Soliz, S.B.G. 1998. Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia. Tesis Mag. Sc. CATIE Turrialba, Costa Rica. 113 p.
- Sprugel, D.G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology* No. 64 (1):209-210.