

Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia

Juan Carlos Camargo¹;
José Alexander Rodríguez²,
Angela María Arango³

Las plantaciones de guadua pueden funcionar como sumideros de CO₂. Los cambios en la capacidad de fijación dependen de la edad de la plantación, del crecimiento y de la madurez de los culmos. A mayor edad de la plantación, se tienen ramets con culmos de mayores dimensiones y, por lo tanto, con más biomasa.



Foto: Grupo de Investigación GATA

¹ Profesor Titular, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. jupipe@utp.edu.co

² Profesor e Investigador, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. pauloalejo@utp.edu.co

³ Investigador, Facultad de Ciencias Ambientales, Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos. angie86ar@hotmail.com

Resumen

Una plantación de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) establecida en Pereira, Colombia en el año 2003 fue evaluada para determinar su patrón de crecimiento y su contribución al secuestro de carbono. La plantación fue establecida con una densidad de 625 plántulas por hectárea, en un área anteriormente utilizada para ganadería. El crecimiento fue evaluado anualmente durante siete años, teniendo en cuenta la emisión de nuevos culmos, la longitud de los mismos y su diámetro basal. La densidad promedio alcanzada a los siete años fue de 11.827 culmos/ha. Para las variables diámetro basal y longitud total de los culmos, el promedio fue 5,1 cm y 10,1 m, respectivamente. Para las tres variables fue posible ajustar modelos que las describen de forma adecuada en función del tiempo. Asimismo, se ajustó un modelo lineal que explica la variabilidad de la longitud total del culmo en función de su diámetro basal. Para la estimación del carbono fijado, se midió la biomasa por medio de muestreo destructivo de culmos y sus compartimentos (rizoma, hojas, ramas). La plantación mostró una capacidad de fijación de 76 t CO₂/ha, de las cuales el 83% se alberga en la parte aérea. Por su rápido crecimiento, la capacidad de fijar carbono y la posibilidad del uso comercial de los culmos, las plantaciones de guadua constituyen una importante opción productiva para regiones con condiciones biofísicas similares.

Palabras claves: *Guadua angustifolia*; bambúes; culmo; madurez; carbono; crecimiento; fijación de carbono; servicios ecosistémicos; modelos de regresión; zona cafetera; Colombia.

Summary

Growth and carbon stock estimation on a guadua plantation from the Colombian coffee region. The growth pattern and the carbon sequestration potential of a guadua bamboo plantation (*Guadua angustifolia* Kunth) were assessed in a farm located in Pereira, Colombia. The guadua plantation was established in 2003 with a density of 625 clumps per hectare in areas previously used by cattle systems. In order to evaluate the growth pattern, new culms, its basal diameter and its length were measured yearly during 7 years. The number of culms at year 7 was 11,827/ha. Culm basal diameter and total length were, in average, 5.1 cm and 10.1 m, respectively. Regression models which properly described growth as a function of time were fitted for the three variables. Additionally, a linear model which explained the variability of length as a function of basal diameter was also fitted. For estimating carbon stored in biomass, a destructive sampling of culms and their compartments (rhizome, leaves and branches) was carried out. The guadua plantation showed a fixing capacity of 76 t CO₂/ha, from which 83% was stored in aboveground biomass. Because of its fast growth, capability of carbon sequestration and commercial culms production, guadua plantations might be an important productive alternative in regions with similar biophysical conditions.

Keywords: *Guadua angustifolia*; bamboos; culms; maturity; carbon; growth; carbon stock; ecosystem services; regression models; coffee zone; Colombia.

Introducción

En la zona cafetera de Colombia es donde se ha dado el mayor desarrollo asociado al manejo de bosques de guadua. Allí existen aproximadamente 28.000 ha bajo esta cobertura (Kleinn y Morales 2006), tanto en plantaciones como en bosques naturales. Según CARDER (2000), las plantaciones equivalen a aproximadamente el 10% del área total de guaduales existentes en el país. En la mayoría de los casos, estas plantaciones han sido establecidas en áreas pequeñas (menos de 5 ha), por lo general no son manejadas y algunos de ellas se encuentran en mal estado debido, precisamente, a la ausencia de prácticas silviculturales (Camargo 2006). Sin embargo, una extensión significativa de terreno podría ser utilizada para el establecimiento de plantaciones de guadua en la zona cafetera (Camargo et ál. 2007).

Las experiencias que se han registrado con plantaciones de guadua en otros países de Latinoamérica muestran resultados exitosos y un potencial ecológico y comercial bastante importante (Cruz 2009). Este autor define diferentes aspectos de manejo y describe variables de crecimiento en plantaciones comerciales de guadua en México. En Colombia no existe mucha información publicada sobre el manejo silvicultural de plantaciones de bambú guadua; sin embargo, ya se tienen sugerencias generales en cuanto al espaciamiento, crecimiento y manejo (ver Giraldo y Sabogal 1999, Cruz 1994, Venegas 1993). Judziewicz et ál. (1999) ofrecen algunas recomendaciones sobre control de malezas y asociaciones, en tanto que Riaño et ál. (2002) estudiaron variables de crecimiento y la fijación de carbono en plantaciones de guadua hasta los seis años de edad. Camargo (2006) describió la dinámica de plantaciones de guadua durante los primeros años de establecimiento; para ello definió variables de crecimiento

y evaluó el efecto de prácticas de manejo, como la fertilización y el control de malezas.

El potencial de los bosques de guadua para la mitigación del cambio climático se refleja en su capacidad como ecosistema para fijar y/o almacenar dióxido de carbono (Cruz 2009, Camargo et ál. 2007, Arias et ál. 2008, Riaño et ál. 2002). Camargo y Kleinn (2010) han diseñado funciones que permiten hacer estimaciones de este potencial; asimismo, Arango (2011) y Arango y Camargo (en este mismo número de RRNA) han evaluado la posibilidad de aplicar esquemas como REDD+ (reducciones de emisiones por deforestación y degradación).

Con esta investigación pretendemos contribuir con información más detallada sobre el crecimiento de la guadua en plantaciones y de sus beneficios ecosistémicos relacionados con la fijación de carbono. Por ello, hemos evaluado el crecimiento durante los siete primeros años y hemos estimado la capacidad para fijar dióxido de carbono en una plantación de la zona cafetera de Colombia.

El sitio de estudio

La plantación se ubica en la finca San Jorge, municipio de Pereira, Colombia. El sitio se encuentra a 1200 msnm, en suelos del orden de los andisoles, con pH neutro, alto contenido de materia orgánica y ligeramente limitados debido a altos contenidos de arcilla. La precipitación promedio anual es de 1900 mm con distribución bimodal y la temperatura media es de 24°C. La plantación se estableció en abril del año 2003, usando plántulas de tres meses que fueron propagadas vegetativamente. En promedio, al momento del establecimiento cada plántula tenía diez culmos y una longitud media de 50 cm en el culmo más alto. Se utilizó un espaciamiento de 4 x 4 m para una densidad total de 625 plántulas por hectárea (Fig. 1).

El sitio donde se estableció la plantación se usó antes para ganadería, por lo que tenía una cobertura de pasto de la especie *Panicum maximum*. Debido a la rapidez del crecimiento de la pastura fue necesario guadañar en promedio cuatro veces al año durante los dos primeros años de la plantación. Posteriormente, con el crecimiento de la guadua, esta labor fue menos frecuente hasta que en el año cuatro ya no fue necesario hacerla.

Evaluación del crecimiento y ajuste de los modelos de regresión

Para la evaluación del crecimiento, se establecieron 18 parcelas de 256 m² (25 plántulas) cada una. En cada parcela se seleccionaron tres plántulas en el centro de la parcela para hacer las mediciones a lo largo del tiempo (parcela útil). Las variables medidas cada año fueron: número de culmos por plántula (N_{CP}), diámetro basal (d_b) y longitud total (l_t). Las mediciones de estas dos últimas variables se realizaron cada vez sobre el culmo más joven encontrado por plántula, teniendo en cuenta que la elongación total de los culmos se alcanza en promedio a los seis meses (Camargo 2006) y que, debido a la ausencia de cambium vascular en las especies de bambú, el diámetro está definido desde el momento en que emergen (Judziewicz et ál. 1999). Por esta razón, para determinar los incrementos en diámetro y longitud solo hay que medir los culmos más jóvenes y diferentes de los medidos el año anterior.

Con el propósito de establecer patrones de crecimiento a partir de las variables evaluadas, se ajustaron modelos de regresión para cada variable en función del tiempo. De esta manera, se evaluaron ocho modelos para N_{CP} , nueve para d_b y siete para l_t . Las funciones de crecimiento utilizadas se tomaron de estudios previos en plantaciones de guadua (Camargo 2006, Riaño et ál.

2002), más otras usualmente utilizadas en mensura forestal (Prodan et ál. 1997). Teniendo en cuenta que los modelos evaluados no fueron lineales, el criterio para su selección fue el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), la raíz del cuadrado medio del error ($RCME$) y el análisis de residuos. De igual manera, se utilizaron técnicas de regresión para evaluar las relaciones entre las variables dendrométricas medidas (d_b) y la longitud total (L_t). Los análisis fueron realizados con el *software* estadístico Statistica 7 (Hill y Lewicki 2007).

Evaluación de la fijación de carbono y del contenido de minerales en la biomasa

Para la evaluación de la biomasa en el año siete, se identificaron secuencias de culmos interconectados o pertenecientes a la misma planta y con diferente estado de madurez. Para medir la biomasa total, la evaluación se realizó sobre “ramets”, los cuales se definen como el culmo con sus respectivas ramas, hojas y rizoma (McClure 1966). Cada ramet, por lo tanto, tenía un grado de madurez diferente. La biomasa se midió con muestras destructivas de 12 ramets tomados de tres parcelas elegidas aleatoriamente. En cada parcela muestreada se eligió una secuencia de ramets previamente marcados con 12, 24, 36 y 48 meses después de haber emergido.

De cada compartimiento de los ramets (rizoma, culmo, rama y hojas) se tomaron los pesos húmedos en campo. Para el mantillo se realizó el muestreo con un marco de 0,25 m² en tres puntos al azar dentro de cada parcela elegida. De cada una de las muestras de compartimientos de los ramets y del mantillo se tomaron submuestras de 250 g, las cuales fueron llevadas a laboratorio y secadas en horno a 60°C durante 48 horas en promedio. A partir de los pesos iniciales y los pesos secos hallados, se estimó la biomasa y el carbono (50%



Figura 1. Plántulas de *Guadua angustifolia* de un año de establecidas a 4 x 4 m, en la finca San Jorge, Pereira, Colombia.

de la biomasa) y, usando un factor de conversión de 3,67 (Márquez et al. 2000) se calculó el contenido de dióxido de carbono (CO₂) total por ramet, por cada compartimiento y en el mantillo. Posteriormente, de acuerdo con la densidad de culmos por hectárea se extrapolaron valores de CO₂. Igualmente, para estimar la cantidad de carbono almacenado en el suelo, en cada parcela se realizó un muestreo de suelo a 50 cm de profundidad, tomando muestras disturbadas en cada sitio para medir el contenido de materia orgánica y muestras no disturbadas en cilindros de volumen conocido para determinar su densidad aparente. La materia orgánica fue medida en el laboratorio de suelos mediante el método Walkley–Black (MacDicken y Brewbaker 1988).

Las muestras de biomasa fueron usadas también para determinar el contenido de nitrógeno por el método de Semimicro-Kjeldhal; las bases (K, Ca, Mg) se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica; el fósforo por el método fotométrico y el sílice mediante la digestión de cenizas.

Resultados y discusión

Crecimiento de las plántulas de guadua

El número promedio de culmos por plántula siete años después del establecimiento fue de 19 (±6), equivalentes a 11.828 (±3884) culmos/ha. Durante los dos primeros años se dio un fuerte incremento de culmos hasta casi cuadruplicar la cantidad a los tres años, cuando empezó una tendencia decreciente que se mantiene hasta los siete años (Fig. 2). Este comportamiento tiene que ver probablemente con una regulación que hace la planta en el incremento de los culmos, ya que con el tiempo estos son más grandes y ocupan mayor espacio. Un comportamiento similar fue registrado por Riaño et ál. (2002), aunque con una densidad de 8640 culmos/ha a los seis años y con un punto de inflexión a los cuatro años.

El diámetro basal y la longitud total se incrementaron de forma exponencial en función del tiempo; a los siete años alcanzaron valores promedio de 5,1cm (±1,7) y 10,1 m (±3,3), respectivamente (Figs. 3 y 4).

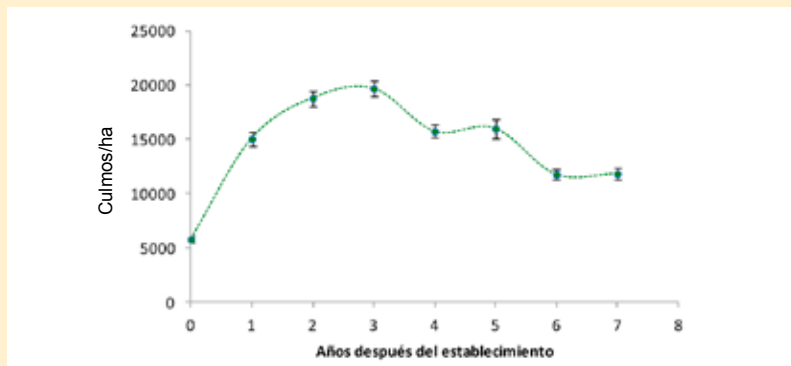


Figura 2. Número de culmos/ha en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en la finca San Jorge, Pereira Colombia. Densidad inicial de 625 plántulas/ha. Líneas verticales representan el error estándar.



Figura 3. Diámetro basal promedio del culmo en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en la finca San Jorge, Pereira Colombia. Líneas verticales representan el error estándar.

Este comportamiento es consistente con el reportado para ambas variables por Camargo (2006) y Riaño et ál. 2002. Sin embargo, las dimensiones en diámetro y longitud fueron menores que las registradas en bosques naturales de guadua (Camargo 2006, García 2004, Rijal 2006). Para ambas variables, la diferencia con respecto a los valores medios registrados por los autores citados fue cercana al 50%, lo que indica que las plantas aún no han alcanzado su crecimiento máximo. Cruz (2009) presenta valores de crecimiento en diámetro y longitud para plantaciones en Colombia que siguen aumentando hasta los nueve años.

Para la plantación analizada, los valores máximos de diámetro basal estuvieron entre 8,3 y 8,4 cm y representan solamente el 4,6% del total (equivalentes a 544 culmos/ha). Estos culmos alcanzarán una madurez adecuada aproximadamente cinco años después, lo que coincide con los resultados de Rodríguez y Camargo (en este mismo número de RRNA). Los resultados del presente estudio difieren ligeramente de lo reportado por Cruz (2009), quien encontró que partir del año 7 en plantaciones de guadua de la zona cafetera de Colombia se empiezan a encontrar culmos con diámetros entre 9,05 cm y 10,58 cm, equivalentes al 4,38% del total o 1590 culmos/ha. Según

el autor, siete años es el momento a partir del cual empiezan a emerger culmos con diámetro comercial. El mismo autor reporta para plantaciones en Colombia, la aparición de culmos con diámetros entre los 8,55 y 10,78 cm a los 7 años, equivalentes a 4,3% ó 818 culmos/ha y toma como referente esta edad para el inicio de la emisión de culmos con diámetros comerciales que requerirán madurar para estar aptos para la cosecha.

García y Camargo (en este mismo número de RRNA) investigaron los requerimientos de diámetros para diferentes subsectores productivos que usan guadua como materia prima. Estos fueron: 12,4 cm para artesanías, 11,4 cm para muebles, 11,7 para construcción y 17,1 para laminados. Tales valores distan de los encontrados en la plantación evaluada; si bien el incremento medio anual en el diámetro basal de los nuevos culmos fue de 0,5 cm por año. Entonces, si se mantiene la tasa promedio actual, se requerirían cerca de 12 años para tener culmos con diámetros comerciales. No obstante, después del año cuatro, se observa que la tasa de incremento tiende a aumentar (Fig. 5), lo cual se relaciona seguramente con la disminución del número total de culmos por plántula que se empieza a dar después de los cuatro años (Fig. 2). Lo anterior es consistente con los valores de diámetro más bajos encontrados por Camargo (2006) en bosques de guadua con menor densidad de culmos.

Ajuste de los modelos de regresión

Los modelos de regresión evaluados son funciones de crecimiento (Prodan et ál. 1997) que nunca han sido usadas para las variables evaluadas en este trabajo, y en plantaciones de guadua específicamente. El ajuste mostrado por los modelos no fue el adecuado para todos los modelos; sin embargo, se seleccionó uno para cada variable de acuerdo con los criterios de selección utiliza-

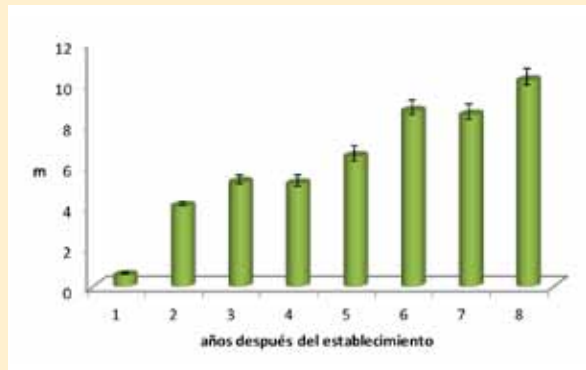


Figura 4. Longitud total del culmo en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en la finca San Jorge, Pereira Colombia. Líneas verticales representan el error estándar.

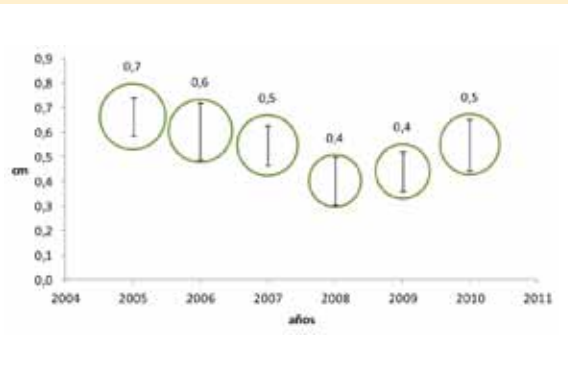


Figura 5. Incremento medio anual del diámetro de culmos nuevos en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en finca San Jorge, Pereira Colombia. Líneas verticales representan el error estándar.

dos (R^2_{adj} , $RCME$, comportamiento de los residuos y número de parámetros en la ecuación).

A pesar del ajuste que mostraron los modelos para las variables evaluadas, el hecho de que el crecimiento no haya culminado hace que no sea recomendable su aplicación para la predicción de la variable dependiente. En el caso de NCP , el $RCME$ es de ± 10 culmos por planta, para el db es de $\pm 1,45$ cm y para la lt de $\pm 2,4$ m (Cuadro 1). Asimismo, la complejidad observada en el comportamiento de la densidad de culmos implica que la mayoría de funciones que se tratan de ajustar generen valores predichos para un rango reducido de los valores de la variable.

Por otro lado, fue posible ajustar un modelo lineal que describe la relación entre lt y db , con el cual fue posible explicar la variabilidad de la lt en un 90% ($R^2 = 0,90$), con un error de $\pm 1,1$ m ($RCME$). Dicha función se define como $l_t = 1,9061 d_b - 0,3669$. Este tipo de relación ha sido evaluada con modelos de regresión también (pe. Camargo 2006); no obstante, en dicho estudio el ajuste del modelo lineal probado fue más bajo. En la Fig. 6, se puede observar la relación entre l' y d^b .

Cuadro 1. Modelos de regresión ajustados para las variables de crecimiento

Variable	Modelo	Expresión	R^2_{adj}	$RCME$	p	Referencia
Número de culmos por plántula (N_{CP})	Exponencial	$N_{CP} = b_0 t^{b_1} e^{b_2 t}$	0,83	10	<0,0001	Prodan et ál. (1997)
$b_0 = 32,50465, b_1 = 0,70724, b_2 = -0,28657, t =$ tiempo después del establecimiento en años						
Diámetro basal del culmo (d_b)	Exponencial	$d_b = b_0 t^{b_1} e^{b_2 t}$	0,86	1,45	<0,0001	Prodan et ál. (1997)
$b_0 = 1,646042, b_1 = 0,542607, b_2 = 0,009441, t =$ tiempo después del establecimiento en años						
Longitud total del culmo (l_t)	Hossfeld	$l_t = \frac{t^{b_0}}{(b_1 + (\frac{t}{b_2}))}$	0,88	2,4	<0,0001	Prodan et ál. (1997)
$b_0 = 1,659903, b_1 = 0,142465, b_2 = 2,934162, t =$ tiempo después del establecimiento en años						

Fijación de carbono y contenido de nutrientes en la biomasa

La biomasa total promedio de un ramet en la plantación de guadua evaluada siete años después del establecimiento es de 4,5 kg ($\pm 2,6$). Esta biomasa está localizada principalmente en la parte aérea (74,6%), que incluye las hojas, las ramas y el culmo. Esta proporción se mantiene a través de todos los estados de madurez evaluados, aunque se presentan ciertos cambios en la distribución de la misma entre los componentes aéreos (Fig. 7). En los ramets más jóvenes, la proporción

de la biomasa del culmo es mayor que en las hojas y ramas. Estos ramets tienen mayores dimensiones en el culmo y, por lo tanto, mayor biomasa. A los 12 meses después de haber emergido, un ramet tiene en promedio 4,7 kg ($\pm 1,4$), en tanto que a los 48 meses el contenido de biomasa es de 1,7 kg ($\pm 0,5$). Es evidente, entonces, la relación entre la edad de la plantación y la cantidad de biomasa. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Riaño et ál. (2002) para la planta completa.

El contenido de CO_2 que puede fijar la plantación evaluada siete

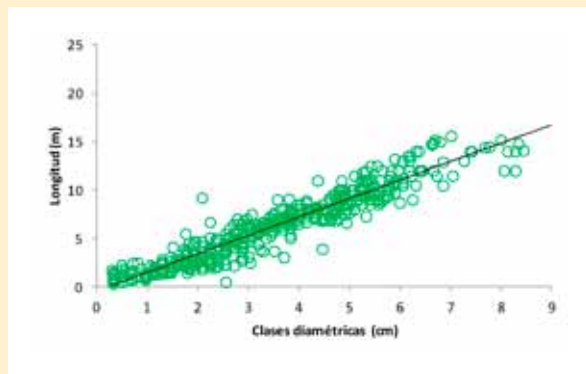


Figura 6. Relación entre la longitud total del culmo (l) y el diámetro basal (d^b), en una plantación de siete años de *Guadua angustifolia* en finca San Jorge, Pereira Colombia.



Figura 7. Distribución de la biomasa por compartimento y estado de madurez en ramets provenientes de una plantación de *Guadua angustifolia* de siete años en finca San Jorge, Pereira Colombia.

años después de establecida es de 76,6 t/ha ($\pm 39,6$), de las cuales el 83% está alojado en la biomasa aérea. Esta estimación se hace teniendo en cuenta la proporción de culmos en diferente estado de madurez y su biomasa asociada, como base para el cálculo de la densidad total de culmos por hectárea. Cuando se usa un valor de densidad total de culmos sin tener en cuenta el estado de madurez, se puede incurrir en una sobreestimación cercana al 27% en la plantación evaluada; o sea, 21 t/ha más de CO_2 debido a que se contabiliza el mismo número de culmos para todos los estados de madurez (Fig. 8). Por lo anterior si se quieren hacer mejores estimaciones de biomasa, es necesario que en el inventario se tenga en cuenta el grado de madurez de los culmos en los ramets evaluados y que la extrapolación a la hectárea se haga según la proporción de culmos en cada grado de madurez. Los valores de carbono en el mantillo y en el suelo a 0,5 m de profundidad, fueron de 10,7 t/ha y 524,2 t/ha respectivamente; o sea que el total de CO_2 almacenado por el sistema es de 611,45 t CO_2 /ha. Este valor de CO_2 total es cercano al estimado por Camargo et ál. (2007) para bosques naturales de guadua (812,2 t CO_2 /ha, aunque en dicho

estudio no se midió el mantillo y las estimaciones en la biomasa aérea se hicieron de forma indirecta a partir de valores de densidad de la madera y el volumen.

En una plantación de guadua de seis años con 8640 culmos/ha, Riaño et ál. (2002) estimaron un contenido total de carbono de 54 t/ha, donde el 80,1% correspondió a biomasa aérea. En el Cuadro 2 se ofrecen valores de fijación de carbono de algunas especies de bambú y de árboles. Como se ve, los valores encontrados en este estudio se encuentran dentro del rango de los estudios referenciados, aunque los resultados no son comparables ya que se trata de especies distintas, en condiciones diferentes y de diferentes edades.

El análisis de nutrientes en la biomasa contribuye a generar información que oriente las prácticas de fertilización. Puesto que este análisis permite conocer la cantidad y proporción de elementos que se almacenan en la biomasa, se podrían dar mejores orientaciones respecto a las necesidades nutricionales de la planta. El análisis de los nutrientes en los distintos compartimentos de la biomasa permitió determinar que, de los minerales en la biomasa, el silicio es el más abundante seguido

del potasio y el fósforo. En estudios sobre guadua realizados por Sanabria y De Wilde (1995), el silicio también mostró ser el elemento más abundante. Aunque el contenido de este elemento aumenta con el tiempo en cada compartimento, su proporción tiende a ser mayor en los culmos. No obstante, como las dimensiones son mayores en los nuevos ramets, los valores más altos se encontraron en los ramets más jóvenes (Fig. 9). En el caso de las hojas, las ramas y el rizoma, el contenido de silicio fue menor en los ramets más jóvenes, lo que seguramente tiene que ver con la cantidad y/o el tamaño.

Conclusiones

- A pesar de los altos valores de densidad total de culmos por hectárea durante los dos primeros años, con el tiempo esta variable tiende hacia valores más cercanos a los encontrados en bosques naturales de guadua. Este incremento, sin embargo, puede tener incidencia en las dimensiones de los culmos, ya que debido a la congestión se alarga el momento de tener culmos con dimensiones comerciales y con un adecuado nivel de madurez. En este sentido, el tiempo para empezar a cose-

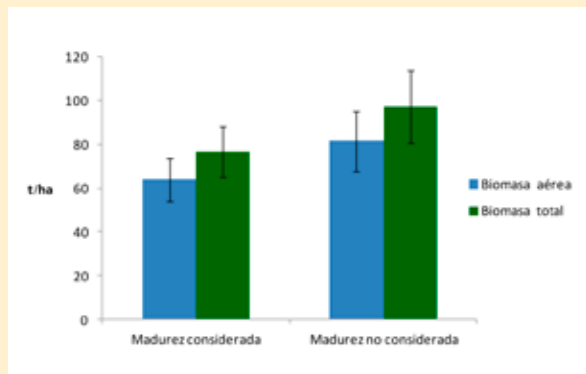


Figura 8. Dióxido de carbono (CO₂) fijado por la biomasa en una plantación de *Guadua angustifolia* de siete años en Finca San Jorge, Pereira Colombia.

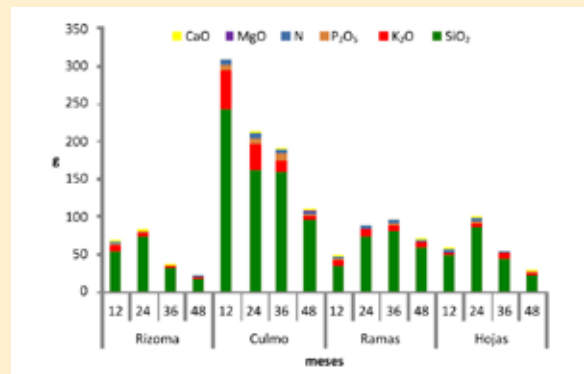


Figura 9. Contenido de calcio (CaO), magnesio (MgO), nitrógeno (N), fósforo (P₂O₅), potasio (K₂O) y silicio (SiO₂) en la biomasa por compartimentos y estado de madurez de una plantación de *Guadua angustifolia* de siete años en finca San Jorge, Pereira Colombia.

char los culmos (turno) depende del momento en que los culmos alcancen dimensiones comerciales, más cinco años que tardan en promedio para alcanzar una adecuada madurez. Por lo anterior, se deben adoptar estrategias que ayuden a mejorar el desarrollo de los culmos –por ejemplo, un espaciamiento adecuado; en el caso que nos ocupa no fue el más acertado-. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el crecimiento siempre dependerá de las condiciones de sitio, por lo que es importante ser prudentes a la hora de decidir que una plantación de guadua es apta para la cosecha de culmos comerciales.

- Factores como el comportamiento de las variables y la juventud de la plantación –por lo que el crecimiento aún no ha culminado- reducen la posibilidad de usar modelos de regresión para la predicción del crecimiento. Las funciones de tipo exponencial fueron las más adecuadas; sin embargo, es probable que otro tipo de funciones con el tiempo sean más eficientes para mejorar la aproximación a la predicción de estas variables.

Cuadro 2. Valores de fijación de carbono por algunas especies de bambú y árboles en plantaciones


Especie	Culmos /ha	t CO ₂ /ha (Edad)	Referencia
Bambú			
<i>Guadua angustifolia</i>	11.827	20,9 (7 años)	Este estudio
<i>Bambusa oldhammi</i>	10.101	51,98* (7 años)	Castañeda-Mendoza et ál. (2005)
<i>Phyllostachys heterocyclus</i>		40,6*	Tian-Ming y Joou-Shian (2011)
<i>Phyllostachys heterocyclus</i>		9,9 – 34,16*	Xiaojun et ál. (2011)
<i>Phyllostachys heterocyclus</i> var. pubescens)		37,1	Huaqiang et ál. (2011)
<i>Phyllostachys pubescens</i>	3300	3,1** (10 años)	Yiping et ál. (2010)
<i>Phyllostachys pubescens</i>		91*(5-8 años)	Isagi et ál. (1997)
<i>Bambusa bambos</i>		149* (6 años)	Shanmughavel y Francis (2002)
Árboles			
<i>Cunninghamia lanceolata</i>		99,5*(5 años)	Tian-Ming y Joou-Shian (2011)
<i>Eucalyptus grandis</i>		40,35*(5 años)	Gutiérrez et ál. (2006)
<i>Cordia alliodora</i>		41,85*(5 años)	Gutiérrez et ál. (2006)
<i>Pinus patula</i>		49,65**(5 años)	Gutiérrez et ál. (2006)

*carbono aéreo

**promedio de carbono neto anual

- Las plantaciones de guadua pueden funcionar como sumideros de CO₂. Los cambios en la capacidad de fijación dependen de la edad de la plantación, del crecimiento y de la madurez de los culmos. A mayor edad de la plantación, se tienen ramets con culmos de mayores dimensiones y, por lo tanto, con más biomasa. En este sentido, un espaciamiento inadecuado puede

ir en detrimento de la capacidad de la plantación para fijar carbono. Las estimaciones de biomasa pueden variar considerablemente en función de la edad, el sitio y el manejo. Con el propósito de contribuir a reducir esta variabilidad y dar mejores estimaciones se recomienda considerar en el inventario el estado de madurez de los culmos.

- El análisis de nutrientes en la biomasa permite conocer la cantidad y proporción de elementos que se almacenan en la biomasa; en este caso se tuvo en cuenta, además, el estado de madurez y la edad de la plantación, lo que permitiría dar mejores orientaciones en cuanto a las necesidades nutricionales de la planta. 

Agradecimientos

Queremos agradecer especialmente a nuestro amigo Gabriel German Londoño Q.E.P.D., propietario de la finca San Jorge, por su apoyo incondicional a las labores de investigación y sus valiosos consejos. Este trabajo se realizó en el marco del proyecto “Tecnología para definir la madurez del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth: una contribución al desarrollo forestal del eje cafetero colombiano”, con el código 1110-452-21121 financiado por Colciencias y ejecutado por la Universidad Tecnológica de Pereira. Agradecemos también a Giovanni Grajales y todos aquellos que han contribuido al manejo y cuidado de la plantación.

Literatura citada

- Arango, AM. 2011. Posibilidades de la guadua para la mitigación del cambio climático; caso: Eje Cafetero Colombiano. Trabajo de Pregrado. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales. 113 p.
- Arango, AM; Camargo, JC. 2012. Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión en el mercado voluntario de carbono y en el Programa REDD+. Recursos Naturales y Ambiente. 61: 71-79.
- Arias, L; Camargo, J; Cardona, H. 2008. Carbono orgánico edáfico en rodales de *Guadua angustifolia* Kunth y en pasturas arborizadas en la zona cafetera de Colombia. In Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, JF. (Eds.). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. Cali, Colombia, Fundación CIPAV. p. 245-261.
- Camargo, JC. 2006. Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Thesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Camargo, JC; Kleinn, C. 2010. Length curves and volume functions for Guadua bamboo (*Guadua angustifolia* Kunth) for the coffee region of Colombia. European Journal of Forest Research 129(6): 1231-1222.
- Camargo, JC; Dossman, MA; Cardona, G; García, JH; Arias, LM. 2007. Zonificación detallada del recurso guadua en el Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca, municipios piloto del Proyecto Manejo Sostenible de Bosques en Colombia (Guía metodológica y resultados). Pereira, Colombia, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Universidad Tecnológica de Pereira, y Corporaciones Autónomas Regionales del Eje Cafetero, Tolima y Valle del Cauca. 144 p.
- CARDER (Corporación Autónoma Regional de Risaralda). 2000. Perspectivas regionales del cultivo de la guadua. In Memorias, Seminario: La guadua como alternativa económica. Pereira, Colombia, Gobernación de Risaralda, Comité de Cafeteros.
- Castañeda-Mendoza, A; Vargas-Hernández, J; Gómez-Guerrero, A; Valdéz-Hernández, JI; Vaquero-Huerta, H. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. Agrociencia 39(1):1405-3195.
- Cruz, H. 1994. La guadua nuestro bambú. Armenia, Quindío, Colombia, CRO y Centro Nacional para el Estudio del Bambú y la Guadua. 293 p.
- Cruz, H. 2009. Bambú-Guadua *Guadua angustifolia* Kunth: bosques naturales en Colombia; plantaciones comerciales en México. Pereira, Colombia. 690 p.
- García, JH. 2004. Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis Mag. Sc. Pereira, Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. 110 p.
- García, JH; Camargo, JC. 2012. Condiciones de calidad de *Guadua angustifolia* para satisfacer las necesidades del mercado en el Eje Cafetero de Colombia. Recursos Naturales y Ambiente. 61: 61-70.
- Giraldo, E; Sabogal, A. 1999. Una alternativa sostenible: la guadua, técnicas de cultivo y manejo. Armenia, Quindío, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Quindío. 192 p.
- Gutiérrez, VH; Zapata, M; Sierra, C; Laguado, W; Santacruz, A. 2006. Maximizing the profitability of forestry projects under the clean development mechanism using a forest management optimization model. Forest Ecology and Management 226: 341-350.
- Hill, T; Lewicki, P. 2007. Statistics: Methods and applications. Statsoft, Tulsa.
- Huaqiang, D; Guomo, Z; Hongli, G; Wenyi, F; Xiaojun, X; Weiliang, F; Yongjun, S. 2011. Satellite-based carbon stock estimation for bamboo forest with a non-linear partial least square regression technique. International Journal of Remote Sensing (33)6: 1917-1933.
- Isagi, Y; Kawahara, T; Kamo, K; Ito, H. 1997. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. Plant-Ecology 130(1): 41-52.
- Judziewicz, EJ; Clark, LG; Londoño, X; Stern, M. 1999. American bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution Press. 392 p.
- Kleinn, C; Morales, D. 2006. An inventory of Guadua (*Guadua angustifolia*) bamboo in the Coffee Region of Colombia. European Journal of Forest Research 125(4):361-368.
- MacDicken, KG; Brewbaker, JL. 1988. Growth rates of five tropical leguminous fuel wood species. Journal of Tropical Forest Science 1(1): 85-93.
- Márquez, L; Roy, A; Castellanos, E. (Eds.). 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Guatemala, Guatemala, Fundación Solar; Hivos, UVG, Winrock International, PROARCAS/CAPAS. 31 p. Disponible en <https://www.winrock.org/fnrm/files/fundacionsolar.pdf>
- McClure, FA. 1966. The bamboos. Washington D.C., Smithsonian Institution Press.
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. Mensura forestal. San José, Costa Rica, GTZ-IICA. 560 p. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible.
- Riaño, NM; Londoño, X; López, Y; Gómez, JH. 2002. Plant growth and biomass distribution on *Guadua angustifolia* Kunth in relation to ageing in Valle del Cauca-Colombia. Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society 16(1): 43-51.
- Rijal, B. 2006. Methodological assessment of sample based bamboo management inventory in Colombia. A partial requirement for M.Sc. in Forestry. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 79 p.
- Rodríguez, JA; Camargo, JC; Suárez Franco, TD. 2012. Determinación en campo de la madurez de culmos de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia. Recursos Naturales y Ambiente, 61: 94-100.
- Sanabria, J; De Wilde, A. 1995. Informe final de las investigaciones en la granja experimental de guadua La Pedrera. Risaralda, Colombia, CARDER. 17 p.
- Shanmughavel, P; Francis, K. 2002. The dynamics of biomass and nutrients in bamboo (*Bambusa bambos*) plantations. Journal of Bamboo and Rattan 1(2):157-170.
- Tian-Ming, Y; Joou-Shian, L. 2011. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. Forest Ecology and Management 261: 995-1002.
- Xiaojun, X; Huaqiang, D; Guomo, Z; Hongli, G; Yongjun, S; Yufeng, Z; Weiliang, F; Wenyi, F. 2011. Estimation of aboveground carbon stock of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest with a Landsat Thematic Mapper Image. Journal of Remote Sensing 32(5): 1431-1448.
- Yiping, L; Yanxia, L; Buckingham, K; Henley, G; Guomo, Z. 2010. Bamboo and climate change mitigation. Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR). Technical Report No. 32. Disponible en: www.INBAR.int
- Venegas, A. 1993. La silvicultura de la guadua en Colombia (reforestación y aprovechamiento). Memorias I Congreso Mundial de Bambú/Guadua. [1993, Pereira, Colombia]. p. 69-72.