

H. Gómez-Castro, R. Pinto-Ruiz, F. Guevara-Hernández y A. Gonzalez-Reyna

**ESTIMACIONES DE BIOMASA AÉREA Y CARBONO ALMACENADO
EN *GLIRICIDIA SEPIUM* (LAM.) Y *LEUCAENA LEUCOCEPHALA* (JACQ.)
Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS SILVOPASTORILES**

Separata ITEA

INFORMACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA AGRARIA, VOL. **106** N.º 4 (256-270), 2010

Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (lam.) y *Leucaena leucocephala* (jacq.) y su aplicación en sistemas silvopastoriles

H. Gómez-Castro*, R. Pinto-Ruiz*, F. Guevara-Hernández*
y A. Gonzalez-Reyna**

* Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad Autónoma de Chiapas, Cuerpo Académico Agroforestería Pecuaria. Carretera Ocozocoautla –Villaflores km. 84.5, Apdo. Postal 78, C.P. 30470 Villaflores, Chiapas, México. Tel +965 655 32 72. E-mail: hgomezc@yahoo.com

** UAM Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria, Cuerpo Académico Mejoramiento y Biotecnología y Sistemas de Alimentación. Apartado Postal No. 149, C. P. 87149, Cd. Victoria, Tamps., México. Tel 834 3181800, Ext. 2116.

Resumen

Los objetivos del presente trabajo fueron 1° determinar y comparar el almacenamiento de carbono atmosférico que tienen *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala*, cuantificando la producción de biomasa y el contenido de carbono en tallo, ramas y follaje mediante una serie de muestras obtenidas de cada especie, y 2°, a partir de las muestras obtenidas establecer ecuaciones de predicción para estimar la biomasa y el almacenamiento de carbono de dichas especies en sistemas silvopastoriles. De esta forma ofrecer servicios ambientales e incentivar su establecimiento en la región. La metodología incluyó muestreos destructivos de 30 árboles de dos especies de importancia forrajera en el Centro de Chiapas, integrando información sobre el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol y los pesos de tronco, ramas y follaje. Se estimó la materia seca de cada una de las muestras secando las mismas con aire forzado durante 48 horas a 60 °C, en horno de secado, determinando el contenido de carbono de las mismas por medio de un autoanalizador para determinar carbono. Con los datos obtenidos se ajustaron una serie de modelos exponenciales y logarítmicos con el uso de un software para análisis estadísticos (SAS, 1990). Para el caso de *L. leucocephala* el modelo de mejor ajuste fue $LN(BA) = -1,46 + 1,69 LN(DAP)$ y para *G. sepium* el modelo $BA = 3,27e^{0,075(DAP)}$. Con base en los resultados del presente estudio, se determinó que *L. leucocephala* tiene mayor producción de biomasa aérea y por consecuencia mayor potencial para almacenar carbono atmosférico que *Gliricidia sepium*, lo que favorece su elección en el establecimiento de prácticas silvopastoriles así como de futuras investigaciones orientadas a la innovación tecnológica para una ganadería sostenible en Chiapas.

Palabras clave: sistemas silvopastoriles, leñosas forrajeras, ecuaciones de predicción, biomasa, secuestro de carbono, servicios ambientales, innovación tecnológica.

Summary

Estimations of aerial biomass and sequestered carbon in *Gliricidia sepium* (lam.) and *Leucaena leucocephala* (jacq.) and its application in silvopastoral systems

The purpose of this study was to determine and compare the potential of atmospheric carbon storage by *Gliricidia sepium* and *Leucaena leucocephala*, through the quantification of biomass production and carbon content in stem, branches and foliage. This was done to estimate the potential it has to be included in the program whose central axis are silvopastoral systems and supply of environmental services in the study region. This was done –by using allometric equations- to estimate the potential of

being included in a local technology innovation program, whose centerpiece is the silvopastoral systems and supply of environmental services in the region of study. The destructive sampling methodology included 30 trees of two forage-potentially species in central Chiapas, by integrating information on the diameter at breast height (DBH), total tree height and weights independent of stem, branches and foliage. We estimated the dry matter of each of the samples by drying them with forced air for 48 hours at 60 °C in a drying oven. We also determined the carbon content with the analyzer CHN. With the obtained data, a series of exponential and logarithmic models were adjusted by using statistical software. In the case of *L. leucocephala* best-fit model was $\ln(ba) = -1,46 + 1,69 \ln(DBH)$ and *G. sepium* model $ba = 3,27e0,075 (DAP)$. The results indicate that *L. leucocephala* has a higher above-ground biomass production and consequently greater potential to store atmospheric carbon than *Gliciridia sepium*. This choice favors the establishment of silvopastoral practices and future research aimed at technological innovation to address sustainable farming in Chiapas, Mexico.

Key words: Silvopastoral systems, allometric equations, biomass, carbon stored, environmental services, technological innovation.

Introducción

El cambio climático global es un tema de alta prioridad a nivel internacional y que frecuentemente se asocia con las actividades antropogénicas que influyen sobre la cantidad de gases de invernadero presentes en la atmósfera, dentro de los cuales el dióxido de carbono (CO₂) juega un papel preponderante ya que, junto a otros gases absorben y emiten radiación en la atmósfera. Estos gases determinan la proporción de energía solar que se absorbe o se devuelve reflejada al espacio. El creciente uso de material fósil para la combustión, la liberación de químicos a las fuentes acuáticas, la actividad agrícola, pecuaria y forestal, la quema de bosques, pastizales y la deforestación han incrementado en un 30 % el CO₂ presente en la atmósfera en los últimos 150 años (De Jong et al., 2007). Muchas observaciones constatan el aumento de la temperatura atmosférica y oceánica, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo, y el aumento del nivel del mar (World Resources Institute, 1998). Por lo que implica este fenómeno, surge la necesidad de buscar alternativas para adaptarse y recuperar el equilibrio, en donde una amplia adopción de sistemas agroforestales puede contribuir

a mitigar los efectos de la concentración de gases de invernadero en la atmósfera, particularmente sobre el CO₂.

Generalmente se considera que aproximadamente la mitad del peso de un árbol maduro es carbono elemental y que mientras el árbol está vivo y productivo extrae más carbono que el que devuelve a la atmósfera (Campbell et al., 1999). Por tal motivo, la reforestación de áreas boscosas como un mecanismo para fijar carbono ha adquirido un nuevo significado. Además, la aparición de permisos de emisiones y compensaciones negociables de carbono estimula la retribución financiera de los beneficios por reducción en las emisiones de carbono y actividades que contrarrestan la acumulación del mismo. En el Protocolo de Kyoto (Grubb et al., 1999) se fundamenta la creación de un mercado internacional sobre esquemas de secuestro de carbono, en el cual los países desarrollados pueden comprar a los países en desarrollo reducciones externamente certificadas de emisiones y usarlas para cumplir los propios límites nacionales. En este sentido, los sistemas agroforestales tropicales, entre los cuales se encuentran los silvopastoriles, pueden considerarse opciones tecnológicas apropiadas para la actividad

ganadera, asumiendo que tienen la ventaja de capturar carbono atmosférico, y que este servicio ambiental tiene la posibilidad de proveer una retribución económica. El pago por servicios ambientales es el resultado de las funciones ecológicas de los ecosistemas para el bienestar de la humanidad, de esta forma estas prácticas pueden ser un factor mitigante para la contaminación ambiental y para el calentamiento global del planeta (Streck, et al., 2008).

La incorporación de árboles en la producción pecuaria mejora el almacenamiento y captura de carbono atmosférico brindando de esta forma servicios ambientales (Andrade e Ibrahim, 2003). Por otra parte, el adoptar prácticas silvopastoriles provee de fuentes de alimentos de mayor valor nutritivo y de fácil adquisición para el ganado; fertilización constante del suelo y una gran variedad de usos alternativos. Hay evidencias de que la incorporación de leñosas forrajeras puede reducir los efectos ambientales del crecimiento de la actividad ganadera en ambientes tropicales, diversificar las unidades ganaderas y promover la intensificación de sistemas extensivos (Locker, 1994).

Existen estudios en la región norte del estado de Chiapas que muestran la viabilidad del uso de ecuaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera en algunas especies (López, et al., 2003), no obstante se requiere obtener información de otras regiones del estado y comparar la capacidad que tienen otras especies para fijar carbono atmosférico, como un elemento fundamental para el monitoreo de carbono y determinar posibles servicios ambientales (Andrade e Ibrahim, 2003). En estudios previos en el centro de Chiapas, se menciona a *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* entre las especies con mayor potencial forrajero en la región, debido entre otras cosas a que presentan valores de degradabilidad ruminal del 74,85 y 45,58%, respectivamente. Así también, se señala que estas especies fue-

ron las más consumidas en una prueba de cafetería (Pinto et al., 2003). Por lo tanto, la evaluación de estas especies para almacenar carbono puede resaltar la importancia de incluirlas en sistemas ganaderos silvopastoriles en el centro de Chiapas.

En este sentido, el objetivo de este trabajo consistió en determinar y comparar el almacenamiento de carbono atmosférico que tienen *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala*, cuantificando la producción de biomasa y el contenido de carbono en tronco, ramas y follaje, y, a partir de las muestras obtenidas establecer ecuaciones de predicción para estimar la biomasa y almacenamiento de carbono de dichas especies en sistemas silvopastoriles, y de esta forma, ofrecer servicios ambientales e incentivar su establecimiento en la región.

Materiales y métodos

Localización geográfica del sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en parcelas de vegetación secundaria con una extensión aproximada de 10 ha, ubicadas en el ejido Cristóbal Obregón del municipio de Villaflores, Chiapas, localizado entre los 16° 14' Latitud Norte y 93° 16' Longitud Oeste, con una altitud de 610 m.s.n.m. (INEGI, 2001). El clima que predomina en esta zona es cálido subhúmedo con lluvias en verano y que está clasificado como (Aw1) (w) (i')g, la precipitación media anual es de 1200 mm y la temperatura media anual de 24,6° C (García, 1987). El suelo en el área de estudio presenta una textura predominantemente areno-arcillosa.

Selección de árboles

Los árboles muestreados para el experimento se tomaron de parcelas de pastoreo con áreas

de vegetación secundaria del ejido Cristóbal Obregón. Se muestrearon árboles mayores de un año de edad, eligiendo 30 árboles por especie con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 5 cm (Mc Dicken, 1997), lo cual hizo un total de 60 muestras cuyo rango de DAP estuvo entre 5 y 23 cm, rango en el cual se encontraban la mayoría de los árboles presentes en el sitio experimental.

Una vez seleccionado el árbol en cuestión, se procedió a tomar el diámetro a la altura del pecho por medio de una cinta diamétrica y después se registró en una base de datos. La altura de los árboles en pie se determinó con la ayuda de un dendrómetro de medición de ángulos, calibrándose a una distancia de 15 m del árbol y verificándose los datos de altura con el uso de cinta métrica. Ya derribado el árbol se pesó por separado en verde el tronco, las ramas y el follaje con la ayuda de una báscula de reloj, colectándose las muestras por componente y por árbol, para posteriormente determinar la materia seca.

Análisis de laboratorio

Para la determinación de materia seca se tomaron muestras de 250 g para cada componente del árbol, para secarlas en un deshidratador durante 48 h, a una temperatura de 60 °C y ser pesadas hasta alcanzar un peso constante. (A.O.A.C., 1980).

Posteriormente para la determinación de carbono, las muestras fueron enviadas al Laboratorio de El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) en San Cristóbal de las Casas, en donde para determinar el carbono se utilizó un autoanalyzer elemental para carbono, hidrogeno y nitrógeno, equipado con sensor de conductividad térmica e infrarojo. El procedimiento para el análisis incluye la deshidratación y molido de muestras, pesaje de muestras, combustión de muestras por duplicado en el autoa-

nalizador, separación de óxidos nitrosos y CO₂ y determinación de carbono.

Análisis estadístico

La biomasa de los distintos componentes de las dos especies de plantas estudiadas se analizaron mediante la comparación de medias de efectos simples utilizando la prueba de Tukey (Steel and Torrie, 1980).

Los modelos que se utilizaron para ajustar los datos obtenidos en el muestreo, se presentan a continuación:

$$BA = (a)(e^{b(DAP)})$$

$$\ln(BA) = a + b \ln(DAP)$$

$$\ln(BA) = a + b \ln(DAP) + c \ln(ALT)$$

$$\ln(BA) = a + b (DAP^2)$$

$$\ln(BA) = a + b \ln(DAP^2)$$

$$\ln(BA) = a + b (DAP) + c \ln(ALT^2)$$

$$\ln(BA) = a + b \ln(DAP*ALT)$$

En donde,

Ln = logaritmo natural,

BA = biomasa aérea en base seca (Kg.),

DAP = diámetro a la altura del pecho,

ALT = altura del árbol,

a, b y c = parámetros del modelo, y

e = exponencial.

Todos los modelos se desarrollaron mediante un software para análisis estadísticos (SAS, 1990). Los modelos de mejor ajuste se seleccionaron con base en los siguientes criterios: coeficiente de variación (CV), cuadrado medio del error (CME), precisión (PRESS) y coeficiente de determinación (R²). También se probaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad por medio del análisis gráfico de los residuales del modelo.

Resultados y discusión

Materia seca

En la tabla 1 se presentan los porcentajes medios de materia seca (MS) del tronco, rama y follaje de las plantas muestreadas de *G. sepium* y *L. leucocephala*. Se puede apreciar que el porcentaje medio de materia seca de *L. leucocephala* es significativamente superior que el de *G. sepium* para los tres componentes. Esta característica puede ser atribuida a que la *L. leucocephala* tiene una densidad excepcionalmente alta (NAS, 1997), lo cual redundará en una mayor cantidad de materia seca y peso del árbol. Se ha citado que la *L. leucocephala* tiene una densidad de 0,52 g/cm³ (FACT, 1998), mientras que Arias et al., (2001) encontraron valores de densidad de 0,43 g/cm³ para *G. sepium*. También se menciona que las condiciones de humedad, afectan a la densidad de los árboles (Vales, 1999).

Con respecto a la materia seca del follaje, en el caso de la *G. sepium* se encontraron valores similares a los publicados por otros autores (Flores, 1992; Rodríguez et al., 1987), sin embargo para *L. leucocephala* se citan porcentajes máximos de 30% de MS (Olmos et

al., 2004; Zarate, 1987), mientras que en este estudio se obtuvo 35,19% de MS. Esto último puede explicarse por el hecho de que la mayoría de los árboles muestreados eran mayores a un año de edad, y se ha reportado que la materia seca del follaje se incrementa con la madurez de los árboles (Gómez et al., 1990). Lo anterior se asocia con la formación de compuestos a partir de CO₂, que son cada vez más complejos y con mayor número de moléculas de carbono conforme el árbol crece, incrementándose de esta forma la densidad del árbol.

En la tabla 1 también se muestran los porcentajes de biomasa promedio del tronco, ramas y follaje de *G. sepium* y *L. leucocephala*. Se observa similitud en la proporción del peso de los componentes en las dos especies con respecto al peso total del árbol. Correspondiendo aproximadamente el 60% del peso seco total al tronco, mientras que las ramas y el follaje aportan alrededor del 30 y 10% del peso total respectivamente. Lo anterior muestra la capacidad que tienen ambas especies como almacenes de carbono, tomando en cuenta que el 90% de la biomasa aérea corresponde al tronco y ramas, componentes que no son consumidos por los animales.

Tabla 1. Porcentajes medios de materia seca y biomasa total de los diferentes componentes de *G. sepium* y *L. leucocephala*
Table 1. Average percentage of dry matter and total biomass of the different components of *G. sepium* and *L. leucocephala*

	% de materia seca		% de biomasa total	
	<i>G. sepium</i>	<i>L. leucocephala</i>	<i>G. sepium</i>	<i>L. leucocephala</i>
Tronco	44,09 ^a	62,63 ^b	60,9	58,3
Ramas	35,76 ^a	51,81 ^b	29,8	30,9
Follaje	26,37 ^a	35,19 ^b	9,3	10,8

Medias con diferentes letras en filas tienen diferencias altamente significativas (P < 0,01).

Costo Total por m². Referido en Tabla No. 4.

A: Comparación de dosis óptima con Testigo Absoluto. R: Comparación de dosis óptima con Testigo Relativo.

Biomasa aérea de las plantas y relación con parámetros dasométricos

La biomasa aérea de las plantas muestreadas de las especies estudiadas y su relación con el diámetro a la altura del pecho se presenta en la figura 1. Se aprecia un incremento directamente proporcional de la biomasa aérea con respecto al DAP, siendo el incremento mas acelerado en el caso de la *L. leucocephala*. Esto último puede asociarse a que, como se mencionó antes, esta especie tiene un alto porcentaje de materia seca y una alta densidad específica, lo cual redundará en una mayor cantidad de biomasa aérea (FACT, 1998).

El potencial de producción de biomasa que tiene la *L. leucocephala* ha sido discutido en otros estudios (Parrotta, 1992b y Torres et al., 2000), de tal forma que junto con otros atributos hacen que esta especie sea considerada una arbórea con excelente potencial forrajero. Se han reportado para la *L. leucocephala* rendimientos de hasta 20 ton ha⁻¹ año⁻¹ de follaje seco (Zarate, 1987; FACT, 1998 y Hernández et al., 1996), mientras que en el caso de la *G. sepium* se presentan producciones de alrededor de 11.9 ton ha⁻¹ año⁻¹ de follaje seco (Vázquez, et al., 1999). La tabla 2 presenta la biomasa promedio de las distintas partes o componentes de las especies estudiadas encuadradas en cuatro

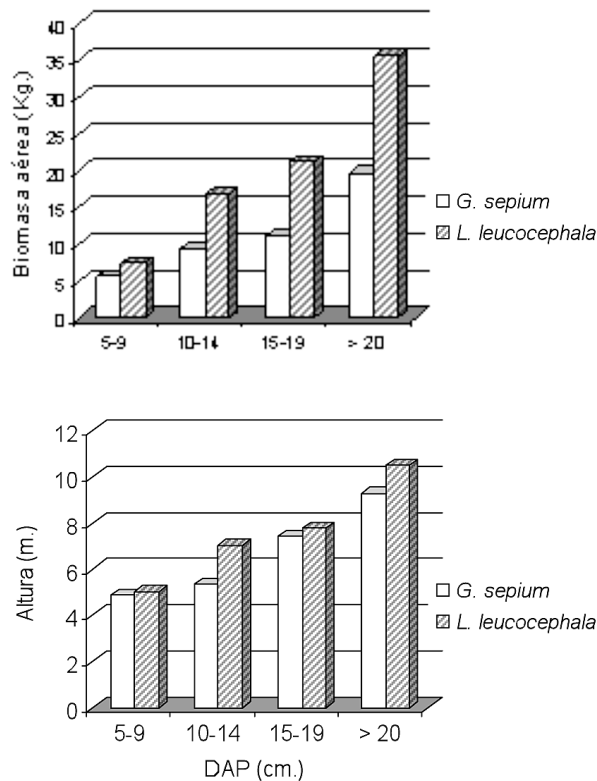


Figura 1. Clasificación de la altura y la biomasa de *G. sepium* y *L. leucocephala* en distintos rangos diámetros (DAP).
 Figure 1. Height and the biomass classification of *G. sepium* and *L. leucocephala* in different diametrical standards (DHP).

Tabla 2. Relación de los rangos del diámetro a la altura del pecho (DAP) y el peso seco por componente y por especie
 Table 2. Relation of the diameter standing at the chest height (DHP) and the dry weight by component and species

<i>G. sepium</i>				<i>L. leucocephala</i>		
Peso seco (Kg.)				Peso seco (Kg.)		
DAP (cm.)	Tronco	Rama	Follaje	Tronco	Rama	Follaje
5-9	3,2	1,5	0,5	4,4	2,1	0,9
10-14	5,3	2,7	0,7	9,7	5,4	1,7
15-19	7,0	3,0	1,0	12,9	6,0	2,4
> 20	10,9	6,8	2,0	19,1	12,5	4,0

distintos rangos diamétricos. Los rangos diamétricos fueron: de 5 a 9, de 10 a 14, de 15 a 19 y mayores de 20 cm de DAP. Se aprecian pesos ligeramente superiores de la *L. leucocephala* en el primer rango diamétrico (5 a 9 cm de DAP), mientras que la diferencia es más notoria en los demás rangos, siendo casi el doble del peso seco de los componentes de *L. leucocephala* en árboles con más de 20 cm. de DAP, esto se explica, como se ha mencionado antes, por la alta densidad que se refleja en un mayor peso de la biomasa aérea de la *L. leucocephala*, en comparación a la *G. sepium*. Esta mayor cantidad de biomasa aérea de la *L. leucocephala* se puede observar claramente en la figura 1, particularmente después de que los árboles alcanzan los 10 cm de DAP, lo cual demuestra una rapidez en el crecimiento en esta etapa que favorece su oferta de biomasa forrajera y su capacidad de almacenar carbono. Por otra parte, se clasificaron las alturas de las plantas de ambas especies por rangos diamétricos (figura 1). Se observa, que la altura de *L. leucocephala* es ligeramente superior en todos los rangos. Este comportamiento puede asociarse a una mayor tasa de crecimiento, como sostienen John y Lowe (2000), quienes mencionan una tasa de crecimiento de 3,3 m y 2,7 m de altura al año para

L. leucocephala y *G. sepium* respectivamente. Asimismo, Parrotta (1992ab) menciona alturas promedio en árboles maduros de entre 8 y 20 m para *L. leucocephala* y entre 5 y 15 m para *G. sepium*.

Segovia et al., (2000), encontraron resultados semejantes a los del presente trabajo en cuanto a la altura con relación al DAP. Ellos reportan que árboles de *L. leucocephala* con DAP de 20 cm. alcanzan una altura promedio de 10,7 m, de la misma manera Aguilar et al., (2001), indican que árboles de este mismo género y con DAP de 12 cm alcanzan una altura aproximada de 6 m.

Contenido de carbono de las plantas analizadas

La cantidad de carbono almacenado por especie en función del DAP se presenta en la figura 2, aquí también se aprecia un incremento directamente proporcional en el contenido de carbono con relación al DAP. El contenido de carbono en *L. leucocephala* es mayor que en *G. sepium* para todos los rangos diamétricos, lo cual era de esperarse debido a la mayor cantidad de biomasa aérea, mayor porcentaje de materia seca y mayor densidad específica de la *L. leucoce-*

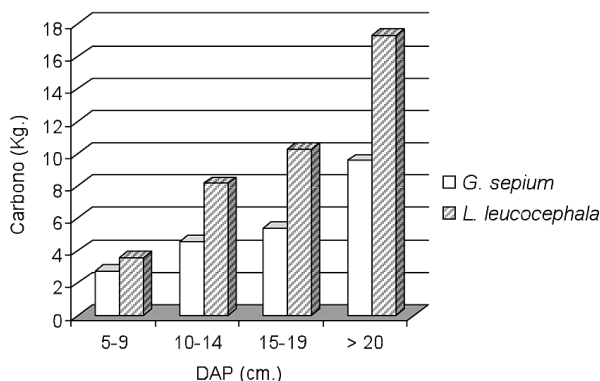


Figura 2. Comparación del carbono almacenado en *G. sepium* y *L. leucocephala* en cuatro rangos diámetros (DAP).

Figure 2. Carbon's comparison stored in *G. sepium* and *L. leucocephala* in four diametrical standards (DHP).

phala, lo cual redonda en un almacenamiento más alto de carbono. Esto también puede estar asociado al hecho de que la *L. leucocephala* posee un metabolismo que la hace muy eficiente en la conversión de CO₂ en carbohidratos y compuestos carbonados (Sánchez, 1993).

En la tabla 3 se presentan los porcentajes de carbono total y por componente que contiene *L. leucocephala* y *G. sepium*. Estos datos son similares entre sí, particularmente si se compara el promedio por especie y muy próximos a la constante del 50% que es recomendado por el IPCC (1996), para la estimación de carbono contenido en árboles. No obstante, en algunos estudios se han uti-

lizado otros porcentajes para la estimación de carbono almacenado en áreas forestales. Así, Segura et al., (1999) utilizaron valores de 43 a 45% de carbono en bosques de baja en la zona atlántica de Costa Rica y Cubero y Rojas (1999) utilizaron valores del 32 al 40% para plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica.

Ecuaciones de predicción para la estimación de biomasa aérea y carbono almacenado

En la tabla 4 se presentan los modelos ajustados a partir de las medidas de distintos parámetros dasométricos de las plantas con

Tabla 3. Contenido de carbono en los componentes de la *G. sepium* y *L. leucocephala*
Table 3. Carbon's content in the components of the *G. sepium* and *L. leucocephala*

	Contenido de carbono (%)			
	Follaje	Rama	Tronco	Promedio
<i>L. leucocephala</i>	49,45	47,33	48,91	48,56
<i>G sepium</i>	48,66	46,82	50,17	48,55

Tabla 4. Modelos utilizados para estimar biomasa aérea de la *G. sepium* y *L. leucocephala* en función al diámetro a la altura del pecho y la altura del árbol

Table 4. Model used to estimate aerial biomass of the *G. sepium* and *L. leucocephala* in function to the diameter at the chest height and the height of the tree

Modelos	CV %	CME	PRESS	R ²
<i>Gliricidia sepium</i>				
BA = 3,27e^{0,075(DAP)}	—	2,49*	—	0,84
LN(BA) = -9,14 + 7,5LN(DAP)	25,27	4,33	149	0,75
LN(BA) = -0,36 + 0,67LN(DAP) + 0,47LN(ALT)	8,6	0,02	0,99	0,86
LN(BA) = 1,58 + 0,003(DAP ²)	10,4	0,04	1,37	0,78
LN(BA) = -0,002 + 0,44LN(DAP ²)	9,04	0,03	1,06	0,84
LN(BA) = 0,82 + 0,67DAP + 0,12LN(ALT ²)	8,99	0,032	1,05	0,84
LN(BA) = -0,44 + 0,61LN(DAP*ALT)	8,5	0,03	0,94	0,86
<i>Leucaena leucocephala</i>				
BA = 4,30e ^{0,102(DAP)}	—	14,1*	—	0,73
LN(BA) = -1,46 + 1,69LN(DAP)	13,65	0,10	3,53	0,83
LN(BA) = -1,63 + 1,29LN(DAP) + 0,60LN(ALT)	12,40	0,08	3,13	0,87
LN(BA) = 1,67 + 0,005(DAP ²)	21,05	0,25	8,37	0,61
LN(BA) = -0,24 + 0,09DAP + 0,45LN(ALT ²)	14,39	0,12	4,24	0,82
LN(BA) = -1,58 + 0,97LN(DAP*ALT)	12,83	0,09	3,16	0,85

LN = logaritmo natural. BA = Biomasa aérea. DAP = Diámetro a la altura del pecho. ALT = altura. CV = coeficiente de variación. CME = Cuadrado medio del error. PRESS = Precisión. R² = coeficiente de determinación. *Cuadrado medio de residuales.

el fin de estimar la biomasa aérea de *G. sepium* y *L. leucocephala* en bosques de trópico seco. Los modelos incluyen los parámetros o variables DAP y altura del árbol (ALT). La tabla también presenta para cada modelo el coeficiente de variación (CV), cuadrado medio del error (CME), la precisión (PRESS) y el coeficiente de determinación (R²). Con base en los coeficientes de determinación (R²), y los CV y CME, se seleccionaron dos modelos para cada una de las especies. Para *G. sepium* se seleccionó un modelo del tipo exponencial y otro logarítmico, mientras que para *L. leucocephala* los dos fueron del tipo logarítmico (en negritas en tabla 4). Se observó que al incorporar la variable altura total de la planta en el modelo, este mejo-

raba, ya que el R² era mayor. Sin embargo, por las dificultades de medir árboles en pie son más prácticos los modelos que incluyen solo la variable DAP.

La figura 3 presenta la grafica de residuales de los modelos que mejor se ajustaron a los datos de *G. sepium*, en donde para la mayoría de los puntos están cercanos al cero, lo que indica una buena precisión y un bajo error en la estimación. La mayoría de los puntos se encuentran dentro del rango promedio de los residuales (-2 a +2), lo cual demuestra que se cumple con el supuesto de normalidad en la distribución de los mismos.

Los residuales de los modelos elegidos para *L. leucocephala*, se encuentran un poco más

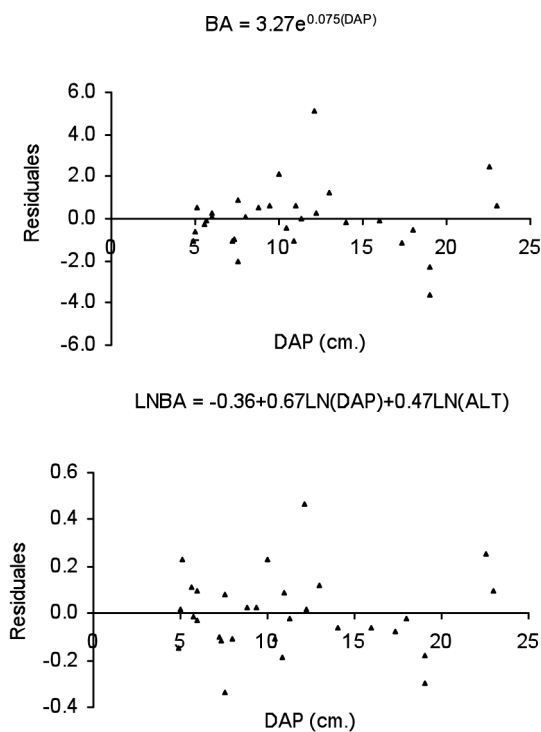


Figura 3. Distribución de los residuales (errores de estimación) para los modelos que mejor se ajustaron a los datos de *G. sepium*.

LN = logaritmo natural. BA = Biomasa aérea.

DAP = Diámetro a la altura del pecho. ALT = Altura total del árbol

Figure 3. Residue distributions (estimational errors) to the models were better adjusted to the data of *G. sepium*.

LN = natural logarithm. BA = Aerial Biomass DHP = Diameter at the chest height.

ALT = Overall height of the tree

dispersos que en gráfica anterior, sin embargo también presentan una distribución normal (figura 4).

Por lo conveniente que resulta utilizar modelos simples y prácticos se utilizó al modelo $BA = 3,27e^{0,075(DAP)}$ para *G. sepium*, y al modelo $LN(BA) = -1,46 + 1,69LN(DAP)$ para *L. leucocephala*. En la figura 5 se muestra la gráfica donde se compara los datos observados con los estimados por el modelo recomendado para *G. sepium*. En esta figura se aprecia una similitud en el comportamiento

de los aglomerados, mostrando una tendencia de tipo exponencial.

Por otra parte para la *L. leucocephala*, la figura 6 también hace una comparación de los aglomerados observados y los datos estimados por el modelo recomendado para esta especie. En este caso también hay una tendencia similar en los dos aglomerados, apreciándose un comportamiento de tipo logarítmico. Los datos de la variable de respuesta (biomasa aérea) están transformados en su correspondiente logarítmico.

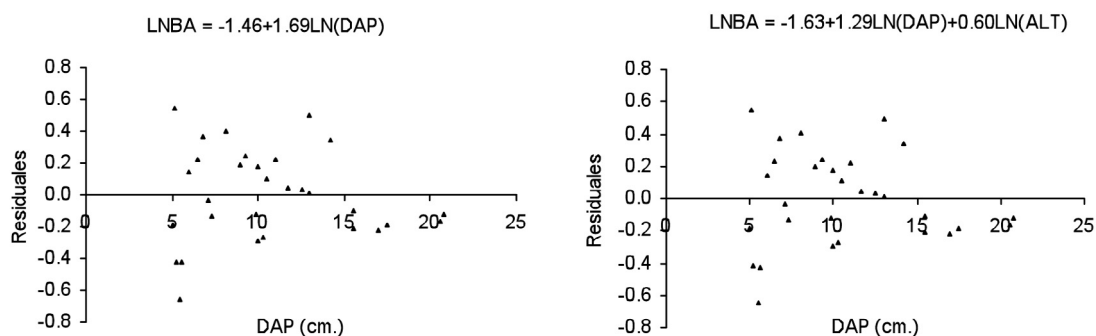


Figura 4. Distribución de los residuales (errores de estimación) para los modelos que mejor se ajustaron a los datos de *L. leucocephala*.

LN = logaritmo natural. BA = Biomasa aérea. DAP = Diámetro a la altura del pecho.
ALT = Altura total del árbol

Figure 4. Residue distributions (estimational errors) to the models were better adjusted to the data of *L. leucocephala*.

LN = natural logarithm. BA = Aerial Biomass. DAP = Diameter at the chest height.
ALT = Overall height of the tree

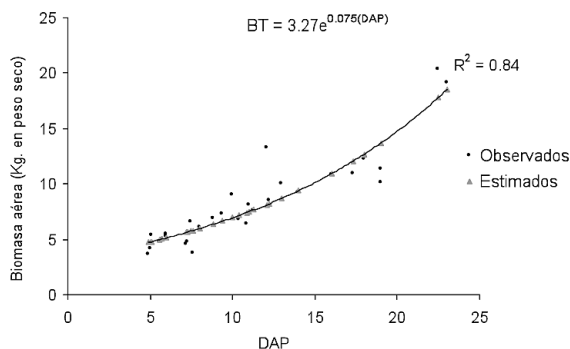


Figura 5. Datos observados y estimados de biomasa aérea de *G. sepium* por modelo exponencial en relación al diámetro a la altura del pecho (DAP).

Figure 5. Observed information and biomass aerial estimated of *G. sepium* by exponential model in relation to the diameter at the chest height (DHP).

La tabla 5 presenta las cantidades estimadas de biomasa aérea y carbono almacenado para distintos DAP. Se puede observar que un árbol de *L. leucocephala* de 20 cm. de DAP puede almacenar 17,29 Kg de carbono en biomasa aérea mientras que un árbol de *G. sepium* del

mismo DAP, solo alcanza 7,16 Kg de carbono. Lo que muestra el mayor potencial tanto de biomasa aérea y de almacenamiento de carbono que tiene la *L. leucocephala*.

Estos modelos fueron desarrollados a partir de datos tomados en la época de estiaje, debi-

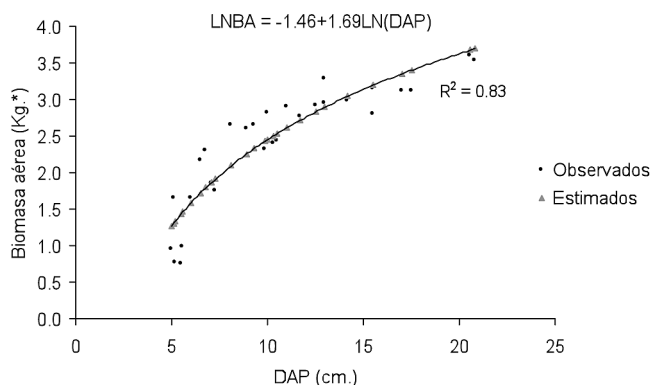


Figura 6. Datos observados y estimados de biomasa aérea de *L. leucocephala* por modelo logarítmico en relación al diámetro a la altura del pecho (DAP).

* Los datos corresponden al logaritmo natural del carbono almacenado en la biomasa aérea.

Figure 6. Observed information and biomass aerial estimated of *L. leucocephala* by logarithmic model in relation to the diameter at the chest height (DHP)

* This information corresponds to the natural logarithm of carbon stored in the aerial biomass.

Tabla 5. Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado utilizando los modelos $LN(BA) = -1,46 + 1,69LN(DAP)$ para *L. leucocephala* y $BA = 3,27e^{0,075(DAP)}$ para *G. sepium*

Table 5. Estimates of aerial biomass and storing carbon using models $LN(BA) = -1,46 + 1,69LN(DHP)$ for *L. leucocephala* and $BA = 3,27e^{0,075(DHP)}$ for *G. sepium*

DAP (cm.)	<i>L. leucocephala</i>		<i>G. sepium</i>	
	Biomasa aérea (Kg. de MS)	Carbono (Kg.)	Biomasa aérea (Kg. De MS)	Carbono (Kg.)
5	3,47	1,68	4,76	2,31
10	11,12	5,39	6,94	3,37
15	21,97	10,66	10,12	4,91
20	35,62	17,29	14,76	7,16

do a esto, las comparaciones con datos obtenidos en temporada de lluvia pueden variar, debido a diferencias en la cantidad de biomasa del follaje, esperándose mayor cantidad de follaje en época de lluvias. Al mismo tiempo, es importante considerar que las mejores estimaciones de carbono se obtendrán en áreas

con árboles que se encuentren entre el rango de 5 a 20 cm de DAP. Las ecuaciones obtenidas permiten estimar la biomasa y fijación de carbono por las especies estudiadas en sistemas silvopastoriles en el trópico, y de esta manera fomentar innovaciones tecnológicas encaminadas a la mitigación del cambio climático.

Conclusiones

Es posible cuantificar con una precisión aceptable la producción de biomasa aérea y el almacenamiento de carbono de *Gliricidia sepium* y de *Leucaena leucocephala* por medio del uso de modelos alométricos de tipo exponencial o con transformación logarítmica. Se utilizarán como variables independientes el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura del árbol. Dichos modelos proporcionan una herramienta para el seguimiento en cuanto a la fijación de carbono en áreas silvopastoriles con fines de ofertar servicios ambientales

Los mejores modelos fueron: $BA = 3,27e^{0,075(DAP)}$ y $LN(BA) = -1,46 + 1,69LN(DAP)$ para *G. sepium* y *L. leucocephala* respectivamente.

De las dos especies estudiadas *L. leucocephala* es la que acumula mayor producción de biomasa aérea y por consecuencia la que tiene mayor potencial para almacenar carbono atmosférico en árboles dentro del rango del DAP estudiado (de 5 a 20 de DAP). Por lo mismo puede ser considerada una especie con potencial para ser incluida en prácticas silvopastoriles en la región Centro de Chiapas.

Los modelos generados en la presente investigación son herramientas útiles para el seguimiento y pago por servicios ambientales vía captura de carbono atmosférico en áreas ganaderas con sistemas silvopastoriles, con *L. leucocephala* y *G. sepium* en el trópico mexicano.

Bibliografía

Aguilar RS, Abundiz BL, Barajas J, 2001. Comparación de la gravedad específica y características anatómicas de la madera de dos comunidades vegetales de México. En: Anales del Instituto de Biología. UNAM. *Serie Botánica*. 72(2)171-185.

Andrade HJ, Ibrahim M, 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería de las Américas*. 10(39) 109-116.

AOAC, 1980. Official methods analysis. 15th ed. Washington, D.C. USA. 1018 p.

Arias SK, Ruiz SC, Milla, HM, Messa AF, Escobar A, 2001. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales de Yaracuy, Venezuela. Instituto Universitario de Tecnología. Yaracuy, San Felipe, Venezuela. *Livestock Research for Rural Development*. (13) 5. <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd13/5/ruiz135.htm>

Campbell KLI, Hodgson NH, Gill M, 1999. Livestock and Environment Toolbox. En: Livestock, Environment and Development (LEAD) Initiative. Food and Agriculture Organisation of the United Nations FAO. Rome.

Cubero JA, Rojas S, 1999. Fijación de carbono en plantaciones de Melina (*Gmelina arborea* Roxb.), Teca (*Tectonia grandis* L. F.) y Pochote (*Bambacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis de grado. Universidad nacional. Heredia, Costa Rica. 93 p.

De Jong Ben HJ, Jiménez FG, Soto-Pinto L, 2007. Agroforestería y secuestro de carbono. En: Jiménez FG, Nahed TJ, Soto-Pinto L. (Eds.) *Agroforestería pecuaria en Chiapas, México*. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México, pp. 27-31.

FACT, 1998. Red de información sobre árboles para bosques, fincas y comunidades. *Winrock International*. Morrilton, AR, USA. <http://www.winrock.org/forestry/factpub/Spleucaena.htm>

Flores RO, 1992. Caracterización y evaluación de forrajes arbóreos para la alimentación de rumiantes en el departamento de Chiquimula, Guatemala. En: Benavides EJ (Ed) *Árboles y arbustos forrajeros de América Central*. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 124 p.

García E, 1988. Modificación del sistema de clasificación de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 133-134.

Gómez ME, Molina EH, Molina J, Murgueitio E, 1990. Producción de biomasa de seis ecotipos de

- matarraton (*Gliricidia sepium*) CIPAV. En: *Livestock Research for Rural Development*. Cali Colombia. 2(3) <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/afri/español/document/lrrd/lrrd2/3/gomez.htm>
- Grubb M, Vrolijk C, Brack D, 1999. The Kyoto Protocol: A Guide to Assessment. *The Royal Institute of International Affairs and Earthscan Publications*.
- Hernández I, Benavides J, Simón L, 1996. CATIE. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. En: Rev. Año de publicación. 1996. Cuba, p. 4.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2001. Villaflores, estado de Chiapas. *Cuaderno Estadístico Municipal*. Edición 2001, 3 p.
- IPCC, 1996. Intergovernmental panel on climate change. 1996. Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. En: *Manual and workbook of the IPCC*. National Greenhouse Gas Inventories. México. D.F.
- John KF, Lowe CA, 2000. Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales. Instituto Internacional de Dasonomía Tropical. *Gen. Tech. Rep. IITF-15*. Rio Piedras, Puerto Rico. 239 p.
- Locker W, 1994. Where's the beef ? Incorporating Cattle into sustainable agroforestry system in the Amazon Basin. *Agroforestry Systems* 25: 227-241.
- López MD, Soto-Pinto L, Jiménez FG, Hernández DS, 2003. Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* en dos comunidades del norte de Chiapas, México. *Interiencia* 28 (6) 334-339.
- MacDicken K, 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International. Arlington, USA. 87 p.
- Montero G, Ruiz-Peinado R, Muñoz M, 2005. Producción de biomasa y fijación de carbono por parte de los bosques españoles. Monografías INIA, Serie Forestal. N° 13. Madrid, España.
- NAS, 1997. Leucaena: promising forage and tree crop for the tropics. *National Academy of Sciences*. Washington, DC. 115 p.
- Olmos MC, 2004. Variación del peso vivo de reproductoras ovinas suplementadas con *Leucaena leucocephala* antes y durante cubriciones. *Revista Virtual Vision Veterinaria*. 3(9) <http://www.visionveterinaria.com>
- Parota JA, 1992a. *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. *Gliricidia*, Madre Cacao. New Orleans, LA. US. Department of Agriculture Forest Service, Southern Forest Experiment Station. En: Francis J, Carol AL (Eds). *Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*.
- Parota JA, 1992b. *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit. *Leucaena tantan*. New Orleans, LA. US. Department of Agriculture Forest Service, Southern Forest Experiment Station. En: Francis J, Carol AL (Eds). *Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*.
- Pinto RR, Gómez CH, Hernández LA, Medina JF, Martínez CB, Aguilar VH, Nahed TJ, Carmona J, 2003. Preferencia Ovina De Árboles Forrajeros Del Centro De Chiapas, México. *Revista Pastos y forrajes*. 26(2):181-190.
- Rodríguez Z, Benavides J, Chavez C, Sanchez G, 1987. Producción de leche de cabras alimentadas con follaje de madero magro (*Gliricidia sepium*) y Poró (*Eritrina poeppigiana*) y suplementados con fruto de patano Pelipita (*Musa sp cv Pelipita*) En: Benavides J, (Ed.). *Árboles y arbustos forrajeros en América Central*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 1994. 298 p.
- Sanchez GA, 1993 Potencialidad agronómica de *Leucaena leucocephala* en la zona de Aroa y Bajo Tocuyo. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Venezuela. FONAIAP DIVULGA N° 42. <http://www.ceniap.gob.ve/publica/divulga/fd42/texto/potencialidad.htm>
- SAS Institute Inc, 1990. SAS Procedures Guide Version C. Third Edition, CARY, N C, 205 p.
- Segovia RS, Sedano R, Reina G, López G, Schoonhoven, 2000. Árboles, arbustos y aves en el agroecosistema del CIAT: Inventario de árboles, arbustos y la avifauna del CIAT. Valle del Cauca, Colombia. Cali, Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 56 p.

- Segura M, 1997. Construcción de modelos alométricos en la estimación de biomasa aérea. Proyecto Cambio de uso de la tierra y flujos de carbono para Centroamérica. U. Helsinki, Finlandia/ CATIE, Costa Rica. Curso internacional sobre ganadería y medio ambiente.
- Steel RGD, Torrie JH, 1980. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. 2 nd Ed. McGraw-Hill Book Co., New York, U.S.A.
- Streck Ch, Sullivan R, Janson T, Tarasofsky R, 2008. Climate change and forest. Emerging Policy and Market Opportunities. 346 p.
- Torres A, Chacón L, Arriojas y Armas S, 2000. Efecto de la poda y los patrones de siembra sobre la producción y arquitectura de la biomasa en bancos de *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit. *Universidad Central de Venezuela*. Trujillo, Venezuela. 18(2):145-161.
- Vales MA, Clemente ME, García E. 1999. Especies maderables CITIES, versión 1.2000. *Universidad de Cordova*, España. <http://www.uco.es/organiza/servicios/jardin/cd1/maderas%20CITIES/peso.htm>
- Vázquez YC, Batis AI, Muñoz I, Alcocer SM, Gual D, Sanchez D, 1999. Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y reforestación. *Instituto de Ecología UNAM/ CONABIO*. México.
- World Resources Institute, 1998. Climate, Biodiversity, and Forests: Issues and Opportunities Emerging from the Kyoto Protocol. 40 páginas. <http://www.wri.org/ffi/climate/>
- Zarate RS, 1987. *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit Subs. *Glabarata*. Mimosaceae. *Phytologia*. 63 (4): 304-306.

(Aceptado para publicación el 1 de septiembre de 2010)