



Evaluación de carbono almacenado en una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Tizimín, Yucatán, México

Dora Alicia García García*, Javier Jiménez Pérez*, José Israel Yarena Yamalle*, Óscar Alberto Aguirre Calderón*, Eduardo Alanís Rodríguez*

DOI: / <https://doi.org/10.29105/cienciauanl22.97-2>

RESUMEN

El carbono se acumula en los ecosistemas forestales mediante la absorción de CO₂ atmosférico y su asimilación en la biomasa. El objetivo del estudio fue evaluar el carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. (teca) de seis años de edad en Tizimín, Yucatán. La toma de datos de campo se realizó en 2017. Para cuantificar el carbono y el bióxido de carbono se efectuó muestreo destructivo en 12 árboles representativos. El carbono almacenado fue de 40.08 ton/ha, y el CO₂ almacenado fue de 147.1 ton/ha. Las plantaciones forestales contribuyen a mitigar el calentamiento global al absorber el CO₂.

Palabras clave: biometría forestal, cambio climático, servicios ambientales, plantaciones forestales, *Tectona grandis*.

ABSTRACT

Carbon accumulates in forest ecosystems through the absorption of atmospheric CO₂ and its assimilation into biomass. The objective of this study was to evaluate the carbon stored in a six-year-old teak plantation in Tizimín, Yucatán. The field data collection was carried out in 2017. To quantify carbon and carbon dioxide, destructive sampling was performed on 12 representative trees. The carbon stored was 40.08 ton/ha, and the CO₂ stored was 147.100 ton/ha. Forest plantations contribute to mitigating global warming by absorbing CO₂.

Keywords: forest biometry, climate change, environmental services, forest plantations, Tectona grandis.

El rol activo e importante que juegan la vegetación y el suelo en el ciclo global del carbono y el cambio climático es reconocido internacionalmente. Éstos pueden actuar como una fuente y a la vez sumidero neto de gases de efecto invernadero (GEI) (Winrock International, 2014). El efecto invernadero que los GEI producen causa el calentamiento de la Tierra. Este fenómeno se denomina calentamiento global (Isaza y Campos, 2007). El bióxido de carbono (CO₂) es el gas más importante de los GEI y representa 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos ellos. El carbono se almacena tanto en la biomasa viva (madera en pie, ramas, follaje y raíces) como en la biomasa muerta (hojarasca, restos de madera, materia orgánica del suelo y productos forestales) (FAO, 2001). El proceso de retención de carbono en los sistemas vegetales se refiere a la capacidad que poseen las plantas de tomar el bióxido de carbono atmosférico, combinarlo con la radiación lumínica y el agua, transformándolo en

moléculas de carbono durante la fotosíntesis (Perry, 1994). La fijación de carbono a través de plantaciones forestales de rápido crecimiento es una alternativa para mitigar el incremento de bióxido de carbono atmosférico (Brown, 2002). El objetivo de esta investigación fue la evaluación de carbono almacenado en una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) de seis años de edad en Tizimín, Yucatán, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) ubicada en el municipio de Tizimín, Yucatán. El predio posee 217.60 hectáreas de árboles de dicha especie (figura 1).

* Universidad Autónoma de Nuevo León.
Contacto: jjimenez20@gmail.com

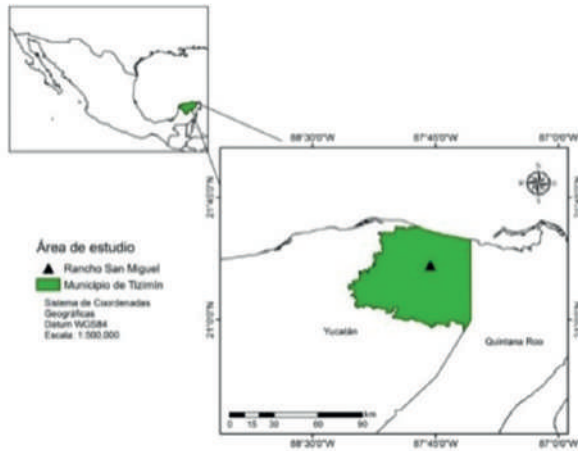


Figura 1. Ubicación de la plantación forestal comercial de *T. grandis* en Tizimín, Yucatán.

Las variables dasométricas se obtuvieron bajo un diseño de muestreo aleatorio previamente determinado en la plantación. Se encuentran establecidas 12 parcelas permanentes de muestreo con área de 992 m², de forma cuadrada que en total suman 11,904 m². La muestra consistió de 816 árboles; los datos colectados fueron diámetro a 0.3 m sobre el nivel del suelo ($d_{0.3}$), diámetro a la altura del pecho ($d_{1.3}$) y diámetros a cada dos metros ($d_2, d_4, d_6, d_8, d_{10}, d_{12}$) hasta la altura total (h) con el dendrómetro Criterion RD 1000®.

Para coleccionar muestras de campo se utilizó el método que propone el Instituto Internacional Winrock (2014) y utilizando también por López *et al.* (2018), el cual consiste en derribar y seccionar árboles, seleccionándose para el presente estudio 12 individuos representativos y sanos, distribuidos en el área de estudio.

Una vez derribados los árboles, fueron medidos en longitud total, longitud del fuste limpio, diámetro del tocón, a la altura del pecho, del centro del tronco y en la parte superior del tronco. De los individuos se colectaron muestras de hojas, ramas y ramillas, mismas que fueron pesadas e identificadas en campo para posteriormente ser trasladadas al Laboratorio de Carbono de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL. Todas las muestras se procesaron de acuerdo al método propuesto por Schlegel *et al.* (2000), citado por Méndez *et al.* (2012).

En laboratorio se determinó la biomasa de hojas, ramas, ramillas y la biomasa total. Asimismo, se determinó la densidad de la madera, el contenido de humedad, el factor de expansión de la biomasa (FEB), el factor de conversión de biomasa a carbono, la cuantificación de carbono y bióxido de carbono.

Para el volumen del fuste se formaron secciones transversales de dos metros de largo, con un diámetro menor y mayor conocidos, calculándose el volumen con la fórmula de Smalian:

$$V_i = \sum_{i=1}^n \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \cdot L_i$$

donde V_i es el volumen de las secciones intermediarias (m³); g_i el área basal en la i -ésima posición (m²) y L_i el largo de la sección en la i -ésima posición (dos metros).

Para obtener la biomasa de hojas, ramas y ramillas se utilizaron las siguientes ecuaciones tomadas de López *et al.* (2018):

$$BH = PFH (kg) * Promedio \left(\frac{Psm (kg)}{Pfm (kg)} \right)$$

$$Bram = PFRam (kg) * Promedio \left(\frac{Psmram (kg)}{Pfmram (kg)} \right)$$

$$Bras = PFRas (kg) * Promedio \left(\frac{Psmras (kg)}{Pfmras (kg)} \right)$$

Para la biomasa del fuste se utilizó esta ecuación:

$$BF = Db * Vol fustal * 1,000$$

donde: BF es la biomasa del fuste (kg); Db es la densidad básica (g/cm³) y Vol fuste es el volumen fustal (m³).

La biomasa total del follaje se obtuvo a través de la siguiente ecuación:

$$BT_{follaje} = PFT_{follaje} * \frac{PSM_{follaje}}{PFM_{follaje}}$$

donde $BT_{follaje}$ es la biomasa total del follaje (kg); $PFT_{follaje}$ es el peso fresco total del follaje (kg); $PSM_{follaje}$ el peso seco de la muestra del follaje (kg) y $PFM_{follaje}$ el peso fresco de la muestra del follaje (kg).

La biomasa total árbol se obtiene mediante la sumatoria de los pesos secos de cada componente (fuste, ramas, ramillas y hojas).

$$BT_{árbol} = BF + BT_{follaje} + BT_{ramas} + BT_{ramillas}$$

donde $BT_{árbol}$ es la biomasa total árbol (kg); BF la biomasa del fuste (kg); $BT_{follaje}$ la biomasa total del follaje (kg); BT_{ramas} la biomasa total de ramas (kg) y $BT_{ramillas}$ es la biomasa total de ramillas (kg).

Para estimar la densidad de la madera se cortaron tres submuestras de rodajas de diferentes secciones del fuste con un grosor de 15 centímetros. Obteniéndose en el tocón en la parte media del fuste y la tercera rodaja en la parte alta del fuste. El material en estado verde se apiló bajo techo y se acondicionó hasta alcanzar 12% de contenido de humedad. A continuación, se elaboraron las probetas definitivas, de 5 cm x 5 cm x 10 cm de longitud. Se siguió la metodología sugerida por las normas Copant 459; 460, 461 (Copant, 1972). La norma Copant 460 precisa el método para la determinación de humedad de la madera mediante la ecuación siguiente:

$$CH = \frac{P_h - P_0}{P_0} * 100$$

en la que CH es el contenido de humedad (%); P_h el peso de la madera húmeda (g); P_0 el peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g).

El método para calcular la densidad de la madera se basa en la norma Copant 461; se aplicaron las siguientes relaciones:

$$D_b = \frac{P_0}{V_v}$$

donde D_b es la densidad básica (g cm^3); P_0 el peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g) y V_v el volumen verde de la probeta (cm^3).

El factor de expansión de biomasa se calculó a partir de los datos de biomasa previamente estimados. Se utilizó la siguiente ecuación para su cálculo:

$$FEB = \frac{B_{total}}{B_{fuste}}$$

donde FEB es el factor de expansión de biomasa; B_{total} la biomasa total (kg); y B_{fuste} la biomasa fuste (kg).

Para la determinación de carbono de los componentes del árbol (madera, corteza, hojas y ramas), se pulverizaron tres submuestras de cada componente en un molino marca Marathon Electric serie C20J020016. La concentración de carbono total se determinó con un equipo analítico denominado Solids TOC Analyzer modelo 1020A de O-I-Analytical. Éste determina las concentraciones en muestras sólidas mediante combustión completa, a una temperatura de 900°C. El factor de conversión de carbono (Norverto, 2006) es el porcentaje de carbono, en masa, que tiene la madera, es decir;

carbono 50%; oxígeno 41%; hidrógeno 6%; nitrógeno 1% y cenizas 2%. Por tanto, la cantidad de carbono por tonelada de materia seca se aproxima a 500 kg (50%). Se calculó con la siguiente ecuación:

$$C_{total} = \frac{B}{1000} * FCBC$$

en la que C_{total} es el carbono total (ton); B la biomasa (kg) y $FCBC$ el factor de conversión de biomasa a carbono.

Para cuantificar el carbono en los árboles se efectuó muestreo destructivo, se generó la siguiente ecuación:

$$C_{acumulado} (tC/\text{árbol}) = [(V_{cc} * D * FEB)] * [(1.1) * FC]$$

La cuantificación del bióxido de carbono en los árboles se efectuó mediante muestreo destructivo, se generó la siguiente ecuación:

$$CO_2_{acumulado} (tCO_2/\text{árbol}) = [(V_{cc} * D * FEB) * ((1.1) * FC)] * [FCO_2]$$

donde V_{cc} es el volumen con corteza del fuste, es decir, del tronco del árbol sin considerar ramas ni raíces; D la densidad de materia seca (g/cm^3) del árbol recién cortado; FEB el factor de expansión de biomasa, parámetro o función que permite estimar el volumen aéreo del árbol a partir de su volumen maderable, es decir, multiplicando el V_{cc} por el FEB obtendremos el volumen de todo el árbol; $Factor R$ es la relación entre biomasa aérea y raíces; $Factor FC$ el factor de conversión de tonelada de materia seca (tms) a tonelada de Carbono (tC) y FCO_2 la proporción molecular para pasar de carbono (C) a bióxido de carbono (CO_2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El volumen fustal de la plantación de *T. grandis* a los seis años de edad es de $73.90 \text{ m}^3/\text{ha}$ (tabla I), este resultado es inferior a lo reportado por Villavicencio (2015), quien determinó un volumen de $80.16 \text{ m}^3/\text{ha}$ y un área basal de $17.58 \text{ m}^2/\text{ha}$, a los seis años de edad en Ecuador con la misma especie.

Tabla I. Variables dasométricas promedio de *Tectona grandis* establecida en Tizimín, Yucatán.

Variables	<i>T. grandis</i>
Diámetro (cm)	12.79
Altura (m)	10.99
Área basal (m^2/ha)	10.812
Volumen (m^3/ha)	73.902

La densidad básica de *Tectona grandis* mostró valor promedio de 0.48 g/cm^3 (tabla II), este resultado es inferior a lo

reportado por Telles *et al.* (2017), quienes determinaron una densidad básica de 0.59g/cm³ en una plantación de 11 años de edad establecida en Nuevo Urecho, Michoacán, y por Rodríguez *et al.* (2014), quienes reportan un valor de 0.55 g/cm³ en plantaciones establecidas en Campeche.

Tabla II. Densidad de la madera de *Tectona grandis*.

Densidad g/cm ³	<i>T. grandis</i>		
	Prom.	Máx.	Mín.
Básica	0.48	0.53	0.38
Verde	1.02	1.13	0.82
Anhidra	0.56	0.68	0.47

La biomasa de los componentes arbóreos y la biomasa total se presentan en la tabla III y en la figura 2, donde se puede observar que el fuste representa 46%, comparado con el resto de los componentes; caso diferente a lo reportado por López (2018), quien encontró que el fuste de *T. grandis* de 16 años representa 92% de biomasa total.

Tabla III. Biomasa promedio por componentes de árboles de *Tectona grandis*.

Hojas	Biomasa (kg)			Total
	Ramas	Fuste		
5.696	12.068	15.243		33.025

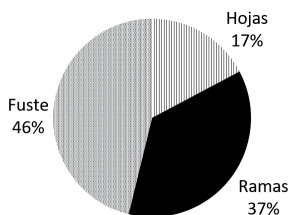


Figura 2. Porcentaje de biomasa contenida en la estructura aérea de *T. grandis* (2011).

El resultado del factor de expansión de biomasa es superior a lo reportado por Orrala y Guiracochoa (2007), quienes determinaron un FEB de 1.39. El resultado del FEB calculado en este estudio es de 2.14 y se encuentran dentro del rango de lo reportado para varias especies en bosques naturales y en plantaciones, tal como lo reporta Soliz (1998), en Bolivia, quien encontró un FEB de 2.5 para las especies evaluadas en un bosque subhúmedo estacional.

El factor de conversión de biomasa a carbono (tabla IV) es de 0.48%. Este resultado se encuentra dentro del rango reportado para diferentes especies del noreste de México (Yamallel *et al.*, 2012).

Para la fijación de carbono y bióxido de carbono se presentan los valores de los parámetros del modelo ajustado, así como sus indicadores de bondad de ajuste y nivel de confiabilidad (tablas IV y V).

Tabla IV. Valores estadísticos de los parámetros del modelo matemático evaluado en la cuantificación del carbono acumulado en *Tectona grandis*.

R^2_{adj}	SCE	CME	β_i	Valor estimado
0.9890	0.00127	0.0000016	0	0.000058
			1	1.597781

Error estándar	Prob>T	REMC	DW
0.0000018	<0.0001	0.00125	1.54
0.00599	<0.0001		

R^2_{adj} =coeficiente de determinación ajustado; SCE=suma de cuadrado del error; CME=cuadrado medio del error; β_i = parámetros estimados; REMC=raíz del cuadrado medio del error; DW=durbin Watson.

Tabla V. Valores estadísticos de los parámetros del modelo matemático evaluado en la cuantificación del bióxido de carbono acumulado en *Tectona grandis*.

R^2_{adj}	SCE	CME	β_i	Valor estimado
0.9889	0.00127	0.000002	0	0.000016
			1	1.597781

Error estándar	Prob>T	REMC	DW
0.00000049	<0.0001	0.00125	1.54
0.00599	<0.0001		

R^2_{adj} =coeficiente de determinación ajustado; SCE=suma de cuadrado del error; CME=cuadrado medio del error; β_i = parámetros estimados; REMC=raíz del cuadrado medio del error; DW=durbin Watson.

Los modelos explican valores porcentuales altos (98%) de la variabilidad total presente en la variable dependiente, y una alta significancia en cada uno de sus parámetros (tablas IV y V), por lo que se consideran apropiados para determinar con mayor precisión el carbono almacenado en función de las variables; volumen total de fuste (V_{cc}), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1+R$), factor de conversión (FC), y el bióxido de carbono almacenado en función de las variables; volumen total de fuste (V_{cc}), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1+R$), factor de conversión (FC) y fijación de CO₂.

Las ecuaciones generadas para cuantificar el carbono y el bióxido de carbono acumulado a partir de los valores de los parámetros de las tablas IV y V quedan definidas como:

$$C_{\text{acumulado}}(t) = [(\beta_0 * (d^2 * H)^{\beta_1}) * [D * FEB]] * [(1 + R) * FC]$$

$$CO_{2\text{acumulado}}(t) = ((\beta_0 * (d^2 * H)^{\beta_1} * D * FEB) * (1 + R) * FC * FCO^2)$$

El carbono almacenado fue de 40.08ton/ha, estos resultados son mayores a lo reportado por Villavicencio (2015) en una plantación de teca de seis años de edad con una cantidad de carbono almacenado de 11.78 ton/ha. Sin embargo, en un sistema agroforestal de *T. grandis* con *Panicum máximum*, establecido en 2000, Orrala y Guiracocha (2007) reportan 84.12 ton/ha de carbono, siendo éste mayor que el estimado para el presente estudio. Por otra parte, Jaramillo y Correa (2015) reportan 17.15 toneladas de C/ha y 62.95 toneladas de CO₂/ha para *T. grandis* en la Provincia El Oro, Ecuador. Quedando los valores calculados para Tzimín, Yucatán dentro de este rango.

Tabla VI. Biomasa, Carbono y CO₂ acumulado en la plantación de teca.

Superficie (ha)	Biomasa (ton/ha)	Superficie (ha)/biomasa (ton/ha)	C (ton/árbol)	C (ton/ha)
217.600	75.912	16,518.48	0.0491	40.082

Superficie (ha)/carbono (ton/ha)	CO ₂ (ton/árbol)	CO ₂ (ton/ha)	Superficie (ha)/CO ₂ (ton/ha)
8,721.42	0.1803	147.100	32,009.02

CONCLUSIONES

La fijación de carbono fue de 40.08 ton/ha y de CO₂ 147.1 ton/ha para esta plantación de seis años de *T. grandis*.

La ecuación generada a partir de datos de inventario y de laboratorio es una herramienta indispensable para la estimación de carbono y el CO₂ acumulado en la plantación de teca.

Estas ecuaciones matemáticas pueden aplicarse en otras plantaciones de *T. grandis* con condiciones de suelo y clima similares a las del estudio.

Es pertinente establecer un sistema de monitoreo hasta la edad de rotación de *T. grandis*.

Las plantaciones forestales forman parte de la gama de servicios ambientales ya que, al absorber CO₂ atmosférico, contribuyen con la mitigación del calentamiento global.

REFERENCIAS

- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Forest Ecology and Management*. 116: 363-372.
- Castellanos, E., Quilo, A., y Mato, R. (2010). *Metodología para la estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales de Guatemala*. Guatemala: Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala/CARE-Guatemala, 31p.
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas (Copant). (1972). *Madera-Selección y colección de muestras* (458, 459, 461, 462, 555, 464, 466). Buenos Aires, Argentina. s/p.
- FAO. (2001). *Situación de los bosques en el mundo*. Montes. Roma, Italia. 175 pp.
- Isaza, J., y Campos, D. (2007). *Cambio climático. Glaciaciones y calentamiento global*. Colombia: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo. 294 pp. Disponible en: http://www.portalplanetasedna.com.ar/efecto_invernadero1.htm
- Jaramillo, R., y Correa, H. (2015). Cuantificación de biomasa área total, carbono almacenado y CO₂ fijado en árboles teca (*Tectona grandis* linn f) en una parcela de muestreo rectangular de 500 m², en una hacienda en la Provincia de El Oro. En *Memoria de Artículos del I Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología*. Ecuador: Universidad Técnica de Machala: 14-19.
- López, H., Vaides, E., y Alvarado, A. (2018). Evaluación del carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala in. *Agronomía Costarricense*. 42(1): 137-153.
- Méndez G., J. et al. (2012). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* Humb & Bonpl. Ex Wild.) M.C. Johnst. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3 (13): 57-72.
10. Norverto, C. (2006). *La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de madera en Argentina*. Buenos Aires: Editorial GRAM.
- Orrala, R., y Guiracocha, G. (2007). *Almacenamiento de carbono en dos sistemas silvopastoriles instalados en Quevedo, Provincia de Los Ríos* (Tesis de grado) Ecuador 11. Perry, D. 1994. *Forest ecosystems*. John Hopkins University Press. Baltimore, U.S.A. pp. 187-193.
- Rodríguez, R., Zamora J., Silva, J., et al. (2014). Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 5(24): 12-25.
- Soliz, B. (1998). Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CA-TIE. 113 p + anexos. Sprugel DG. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*. 64(1): 209-210.