

# CONCENTRACIÓN DE CARBONO EN TRES ESPECIES DE ÁRBOLES TROPICALES DE LA SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO

## CARBON CONCENTRATION IN THREE SPECIES OF TROPICAL TREES IN THE SIERRA SUR OF OAXACA, MÉXICO

Martín Aquino-Ramírez<sup>1</sup>, Alejandro Velázquez-Martínez<sup>1\*</sup>, Jorge D. Etchevers-Barra<sup>3</sup>, Juan F. Castellanos-Bolaños<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Postgrado en Ciencias Forestales, <sup>3</sup>Postgrado Edafología, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. (alejvela@colpos.mx). <sup>2</sup>INIFAP-CIRPAS-Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. 68200. Melchor Ocampo No. 7, Santo Domingo Barrio Bajo, Villa de Etla, Oaxaca.

### RESUMEN

Todos los ecosistemas terrestres, pero en especial los bosques tropicales, son importantes para mitigar el cambio climático global ya que absorben y almacenan CO<sub>2</sub> en forma de biomasa en los árboles. La identificación de la concentración de carbono (CC) en las especies arbóreas contribuye a mejorar las estimaciones de carbono (C) cuando se trata de hacer estimaciones en áreas relativamente grandes. El objetivo de este estudio fue determinar y comparar la CC en tres especies tropicales de árboles: *Alchornea latifolia* Sw, *Cupania dentata* DC. e *Inga punctata* Willd. de la Sierra Sur de Oaxaca, México. Por lo tanto, se midió la CC en fuste, ramas y hojas en árboles de diámetros diferentes. Para cada especie se seleccionaron tres individuos en tres categorías diamétricas CD I (menor a 10 cm), CD II (entre 10 y 20 cm) y CD III (entre 21 y 35 cm) de las que se obtuvieron muestras para los componentes estructurales. La CC expresado en porcentaje de la biomasa se determinó en un analizador automático de carbono total Shimadzu TOC 5000-A. Los datos se analizaron en un ANDEVA para un diseño completamente al azar y las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). La CC en los componentes estructurales y categorías diamétricas en las tres especies fueron inferiores al valor que de manera genérica se maneja como aceptado del 50 %. La menor CC se presentó en el fuste de la CD I de *I. punctata* con 44.82 %, y la más alta fue en las hojas de la CD III de *C. dentata* con 47.72 %. La media general de CC fue  $46.20 \pm 1.03$  %. Las variaciones en CC deben considerarse para mejorar la precisión en las estimaciones del contenido de C en los árboles y bosques tropicales.

### ABSTRACT

All terrestrial ecosystems, but especially tropical forests, are important to mitigate global climate change since they absorb and store CO<sub>2</sub> in biomass form in the trees. The identification of the carbon concentration (CC) in tree species contributes to improve the estimations of carbon (C) when the aim is to make estimations in relatively large areas. The objective of this study was to determine and compare the CC in three tropical species of trees: *Alchornea latifolia* Sw, *Cupania dentata* DC. and *Inga punctata* Willd. from the Sierra Sur of Oaxaca, México. Therefore, the CC was measured in the stem, branches and leaves in trees of different diameters. For each species, three individuals were selected in three diametric categories CD I (less than 10 cm), CD II (between 10 and 20 cm) and CD III (between 21 and 35 cm) from which samples were obtained for the structural components. The CC expressed in percentage of biomass was determined in a Shimadzu TOC 5000-A total carbon automatic analyzer. The data were analyzed with ANOVA for a completely random design and the means were compared with the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ). The CC in the structural components and diametrical categories in the three species were lower than the value that was accepted generically of 50 %. The lowest CC was found in the stem of the CD I of *I. punctata*, with 44.82 %, and the highest was in the leaves of CD III of *C. dentata* with 47.72 %. The general mean of CC was  $46.20 \pm 1.03$  %. The variations in CC should be taken into account to improve the accuracy in the estimations of the content of C in tropical trees and forests.

\*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: julio, 2017. Aprobado: febrero, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 52: 455-465. 2018.

**Keywords:** tropical sub-evergreen forest, biomass, carbon capture, structural components, diametrical categories.

**Palabras clave:** bosque tropical subperennifolio, biomasa, captura de carbono, componentes estructurales, categorías diamétricas.

## INTRODUCCIÓN

Las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> provenientes de la quema de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo de los terrenos forestales desde la revolución industrial han contribuido a un aumento del 40 % en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, es decir de 280 ppm en 1750 a 403.64 ppm en octubre de 2017 (Dlugokencky y Tans, 2017), por lo cual el uso de áreas arboladas como estrategia para el secuestro de carbono (C) es importante (IPCC, 2007). Los bosques contribuyen a mitigar el cambio climático global por su influencia en el ciclo global del C (Tessfaye *et al.*, 2016), mediante la absorción y la acumulación de CO<sub>2</sub> en las hojas, ramas, tronco y raíces en forma de biomasa. La identificación del potencial de captura y almacén de C en los bosques es necesario para mejorar el conocimiento de la dinámica del balance de C a diferentes escalas, y también para la interpretación de las variaciones observadas en el intercambio de C entre la atmósfera-biosfera, y en la evaluación de las políticas públicas para mitigar las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> (Dugan *et al.*, 2017).

Para calcular el contenido de C almacenado a partir de la biomasa de los árboles se usa el factor conversión del 50 % del peso seco (Houghton, 2005; Basuki *et al.*, 2009; Thomas y Martin 2012), independiente de la especie, de la estructura del árbol y del tipo de bosque. Sin embargo, el uso general de este valor para estimar C almacenado en la vegetación forestal puede ocasionar problemas de sub y sobreestimación (cerca de 5 %) (Thomas y Malczewski, 2007; Martin y Thomas, 2011). Cuando las estimaciones de C se hacen a otro nivel, por ejemplo regional o nacional, pueden generar sobrestimaciones de la realidad (Gao *et al.*, 2016) y, además, la concentración de carbono (CC) en los árboles puede variar de 41.9 a 51.6 % en especies tropicales (Elias y Potvin, 2003; Martin y Thomas, 2011), 45.7 a 60.7 % en especies subtropicales y 43.4 a 55.6 % en especies templadas y boreales (Thomas y Martin, 2012; Gao *et al.*, 2016). Mientras, la CC en arbustos tiene una variación de 0.41 a 0.50 % y de 0.38 a 0.50 % en hierbas (Razo *et al.*, 2015). Esta variación puede estar en función de la

## INTRODUCTION

The anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub> from the burning of fossil fuels and the changes in land use of forest lands since the Industrial Revolution have contributed to an increase of 40 % in the atmospheric concentration of CO<sub>2</sub>; that is, from 280 ppm in 1750 to 403.64 ppm in October, 2017 (Dlugokencky and Tans, 2017). Therefore, the use of tree areas as a strategy for carbon (C) sequestration is important (IPCC, 2007). Forests contribute to mitigating global climate change because of their influence in the global cycle of C (Tessfaye *et al.*, 2016), through the absorption and accumulation of CO<sub>2</sub> in the leaves, branches, stem, and roots in the form of biomass. The identification of the potential for capture and storage of C in forests is necessary to improve the understanding of the dynamics of C balance at different scales, and also for the interpretation of the variations observed in the exchange of C between the atmosphere and the biosphere, and in the evaluation of public policies to mitigate the anthropogenic emissions of CO<sub>2</sub> (Dugan *et al.*, 2017).

In order to calculate the content of C stored from the biomass of trees, the conversion factor of 50 % of the dry weight is used (Houghton, 2005; Basuki *et al.*, 2009; Thomas and Martin, 2012), regardless of the species, from the structure of the tree and type of forest. However, the general use of this value in the estimations of C stored in the forest vegetation can cause problems of under and over estimation (close to 5 %) (Thomas and Malczewski, 2007; Martin and Thomas, 2011). When the estimations of C are made at a different level, for example regional or national, they can generate over estimations of the reality (Gao *et al.*, 2016), and, in addition, the carbon concentration (CC) in trees can vary from 41.9 to 51.6 % in tropical species (Elias and Potvin, 2003; Martin and Thomas, 2011), 45.7 to 60.7 % in subtropical species and 43.4 to 55.6 % in temperate and boreal species (Thomas and Martin, 2012; Gao *et al.*, 2016). Meanwhile, the CC in shrubs shows a variation of 0.41 to 0.50 % and in herbs of 0.38 to 0.50 % (Razo *et al.*, 2015). This variation can be in function of the species, the tree tissue, the management practices, the sampling method, the climate conditions, and the technique used for its

especie, del tejido del árbol, las prácticas de manejo, el método de muestreo, las condiciones climáticas y de la técnica usada para su determinación, lo que causa dificultades para comparar la CC entre los estudios (Bert y Danjon, 2006; Martin y Thomas, 2011).

Las mediciones de CC en México se han realizado principalmente en especies de coníferas de clima templado (Figueroa *et al.*, 2010; Yerena-Yamallel *et al.*, 2012; Pompa-García y Yerena-Yamallel, 2014; Hernández-Vera *et al.*, 2017), en algunas latifoliadas de clima tropical y subtropical (Figueroa *et al.*, 2005; Hernández-Vázquez *et al.*, 2012; Villanueva-López *et al.*, 2015; Pompa-García *et al.*, 2017a) y escasamente en especies herbáceas (Razo *et al.*, 2015). Por lo anterior, la identificación de las variaciones de CC en especies tropicales sería una herramienta para mejorar las estimaciones de biomasa a carbono.

El objetivo de este estudio fue determinar y comparar la CC del fuste, ramas y hojas para diámetros diferentes de los árboles de *Alchornea latifolia* Sw., *Cupania dentata* DC. e *Inga punctata* Willd., que son especies nativas del bosque tropical subperennifolio de la Sierra Sur de Oaxaca, México. La hipótesis fue que existen diferencias en la CC entre especies, componentes estructurales y categorías diamétricas del árbol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se realizó en el predio particular de la finca La Cabaña ubicado entre 15° 56' 13.54" y 15° 55' 12.85" N, y 96° 24' 09.13" y 96° 23' 51.83" O, en una superficie de 300 ha situada en la región fisiográfica de la Sierra Sur de Oaxaca, municipio de Pluma Hidalgo. El clima es semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (ACm), temperatura de 18 a 26 °C, precipitación de 1500 a 3500 mm. La geomorfología de la zona es sierra baja compleja con un tipo de suelo Phaeozem (INEGI, 2010). La vegetación corresponde a un bosque tropical subperennifolio donde el estrato arbóreo está conformado principalmente por las especies: *A. latifolia* Sw., *C. dentata* DC., *I. punctata* Willd., *Astronium graveolens* Jacq., *Pterocarpus acapulcensis* Rose, *Inga paterno* Harms, *Homalium trichostemon* S.F. Blake, *Saurauia serrata* D.C., *Cecropia obtusifolia* Bertol., *Diphysa robinioides* Benth., *Lonchocarpus guatemalensis* Benth., *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC., *Cupania glabra* Sw. y *Bursera simaruba* (L.) Sarg.

Las especies seleccionadas para este estudio fueron *A. latifolia*, *C. dentata* e *I. punctata*, y forman parte del bosque natural.

determination, causing for the comparison of CC between studies to be difficult (Bert and Danjon, 2006; Martin and Thomas, 2011).

Measuring CC in México has been done primarily in species of conifers of temperate climate (Figueroa *et al.*, 2010; Yerena-Yamallel *et al.*, 2012; Pompa-García and Yerena-Yamallel, 2014; Hernández-Vera *et al.*, 2017), in some broadleaves of tropical and subtropical climate (Figueroa *et al.*, 2005; Hernández-Vázquez *et al.*, 2012; Villanueva-López *et al.*, 2015; Pompa-García *et al.*, 2017a), and sparsely in herbaceous species (Razo *et al.*, 2015). Therefore, the identification of the CC variations in tropical species would be a tool to improve the estimations of biomass to carbon.

The objective of this study was to determine and compare the CC of the stem, branches and leaves for different diameters of the trees of *Alchornea latifolia* Sw., *Cupania dentata* DC. and *Inga punctata* Willd., which are native species of the sub-evergreen tropical forests of the Sierra Sur of Oaxaca, México. The hypothesis was that there are differences in the CC between species, structural components and diametrical categories of the tree.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The study was carried out in the private plot of La Cabaña farm, located between 15° 56' 13.54" and 15° 55' 12.85" N, and 96° 24' 09.13" and 96° 23' 51.83" W, on a surface of 300 ha found in the physiographic region of the Sierra Sur, in Oaxaca, municipality of Pluma Hidalgo. The climate is semi warm humid with abundant summer rains (ACm), temperature of 18 to 26 °C, and precipitation of 1500 to 3500 mm. The geomorphology of the zone is complex low sierra with Phaeozem soil type (INEGI, 2010). The vegetation corresponds to a sub-evergreen tropical forest where the tree stratum is made up primarily by the following species: *A. latifolia* Sw., *C. dentata* DC., *I. punctata* Willd., *Astronium graveolens* Jacq., *Pterocarpus acapulcensis* Rose, *Inga paterno* Harms, *Homalium trichostemon* S.F. Blake, *Saurauia serrata* D.C., *Cecropia obtusifolia* Bertol., *Diphysa robinioides* Benth., *Lonchocarpus guatemalensis* Benth., *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC., *Cupania glabra* Sw. and *Bursera simaruba* (L.) Sarg.

The species selected for this study were *A. latifolia*, *C. dentata* and *I. punctata*, and they are part of the natural forest. However, these species are not considered ecologically important in México

Sin embargo, estas especies no se consideran ecológicamente importantes en México (Pompa-García *et al.*, 2017b), a pesar de su abundancia en la vegetación natural y su uso en los sistemas tradicionales de producción de café en la sierra sur de Oaxaca, ya que son especies proveedoras de sombra y multipropósito (Ventura-Aquino *et al.*, 2008). Así mismo, la madera de *A. latifolia* y *C. dentata* se utiliza para construcciones de casas, obras rurales y mangos de herramientas agrícolas (Pennington y Sarukhán, 2005). *Inga punctata* proporciona algunos productos secundarios como forraje, frutos y combustible a los productores agroforestales.

### Obtención de muestras

Para todas las especies se seleccionaron tres categorías diamétricas: CD I (menor a 10 cm), CD II (entre 10 y 20 cm) y CD III (mayor a 20 y menor a 35 cm) y se eligieron tres individuos de cada categoría. La copa del árbol se dividió en tres secciones: baja, media, alta (Zhang *et al.*, 2009) y en cada una se seleccionaron al azar una rama de la que se obtuvo una rodaja (aproximadamente 5 cm de espesor), y de la misma una muestra aproximada de 250 g del follaje. Del fuste se obtuvo una rodaja a la altura de 1.30 m desde el nivel del suelo. Todas las muestras se colocaron en bolsas de papel con sus respectivas etiquetas y se transportaron al Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, donde se secaron en estufa (Nyle modelo L500) a 70 °C hasta peso constante como lo indican los procedimientos descritos por Etchevers *et al.* (2005) para la determinación de CC en muestras vegetales. Luego, del material de ramas y hojas recolectado en cada sección de copa se tomó una submuestra de 50 g para formar una sola muestra compuesta de cada componente del árbol, y de la rodaja del fuste también se obtuvo una submuestra que incluyó albura, duramen y corteza de forma tal que incluyera la misma proporción. Todas las submuestras se cortaron en fracciones pequeñas (astillas) y picadas con navajas y tijeras. Para lograr la homogeneidad en el material, las muestras se pulverizaron hasta pasar la malla 40 en un molino General Electric Mod. 5KH39QN5525 y se depositaron en sobres etiquetados para su determinación.

### Medición de carbono

Antes del análisis de carbono, las submuestras compuestas se secaron a 70 °C por 24 h para retirar la humedad absorbida del ambiente. Después, cerca de 30 mg se colocaron en un analizador automático de carbono total Shimadzu TOC 5000-A para medir la CC por la técnica de combustión seca a 900 °C y medición del CO<sub>2</sub> liberado mediante espectrometría infrarroja (Etchevers *et*

(Pompa-García *et al.*, 2017b), despite their abundance in the natural vegetation and their use in traditional systems of coffee production in the Sierra Sur of Oaxaca, since they are species that provide shade and are multipurpose (Ventura-Aquino *et al.*, 2008). Likewise, the wood of *A. latifolia* and *C. dentata* is used for constructions of houses, rural works, and handles of agricultural tools (Pennington and Sarukhán, 2005). *Inga punctata* provides some secondary products such as fodder, fruits and fuel to agroforestry producers.

### Obtaining samples

For all the species, three diametrical categories were selected: CD I (less than 10 cm), CD II (between 10 and 20 cm) and CD III (more than 20 and less than 35 cm), and three individuals were elected from each category. The tree crown was divided into three sections: low, medium, high (Zhang *et al.*, 2009) and in each of them, a branch was selected randomly from which a disk (approximately 5 cm thick) was obtained, and from the same an approximate sample of 250 g of foliage. From the stem, a disk was obtained at a height of 1.30 m from the ground level. All the samples were placed in paper bags with their corresponding labels and were transported to the Laboratory of Soil Fertility and Environmental Chemistry in Colegio de Postgraduados, where they were dried in a stove (Nyle model L500) at 70 °C until constant weight as indicated by the procedures described by Etchevers *et al.* (2005) for determination of CC in plant samples. Then, from the material of branches and leaves collected in each section of the crown, a subsample of 50 g was taken to form a single compound sample from each component of the tree, and from the trunk slice a subsample was also obtained that included sapwood, heartwood and bark in such a way that it included the same proportion. All the subsamples were cut into small fractions (splinters) and ground with knives and scissors. In order to achieve homogeneity in the material, the samples were pulverized until they passed through the mesh 40 in a General Electric Mod. 5KH39QN5525 mill, and were deposited in envelopes labeled for their determination.

### Measuring carbon

Before the carbon analysis, the compound subsamples were dried at 70 °C for 24 h to take out the moisture absorbed from the environment. After, around 30 mg were placed in a Shimadzu TOC 5000-A automatic analyzer of total carbon, to measure the CC by the dry combustion technique at 900 °C and measuring the CO<sub>2</sub> released through infrared spectrometry (Etchevers *et al.*, 2005). A total of 81 compound subsamples were analyzed, corresponding to 27 individuals per species.

al., 2005). Un total de 81 submuestras compuestas se analizaron, correspondientes a 27 individuos por especie.

**Análisis estadístico**

Con los datos se realizó un ANDEVA de tres factores para evaluar los efectos de especie, categoría diamétrica y componente estructural en la CC y las interacciones correspondientes con la especie. Para el factor especie se consideraron tres niveles (*A. latifolia*, *C. dentata* e *I. punctata*), al igual que el factor categoría diamétrica (CD I, CD II, CD III) y el factor componente estructural (fuste, ramas, hojas), agrupando los datos en un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×3×3 con tres repeticiones. La prueba de Tukey (p≤0.05) se usó para los factores o interacciones que presentaron diferencias significativas. Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron validados para el modelo mediante la prueba de Shapiro-Wilk y Levene (Montgomery, 2012). Además, las diferencias entre la CC promedio de cada especie y el valor genérico de conversión de biomasa estándar (50 %) (Basuki *et al.*, 2009; Houghton, 2005; Thomas y Martin, 2012) se evaluaron estadísticamente con una prueba t student (p≤0.01). Estos análisis se realizaron con el software R versión 3.3.3 (R Development Core Team, 2017) y con el paquete *agricolae* (De Mendiburu, 2016).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Concentración de carbono por especie**

Los resultados del laboratorio mostraron que la CC en las tres especies se encontró en un intervalo de 44.13-48.70 %, con una media general de 46.20 %. La CC fue significativamente diferente entre especies ( $F_{2, 54}=14.03$ ,  $p\leq 0.0001$ ). La especie con la mayor CC promedio fue *C. dentata* con 46.71 %, y después *A. latifolia* (46.02 %) e *I. punctata* (45.86 %) (Cuadro 1). Los resultados de la prueba de t fueron para *A. latifolia* ( $t=-18.32$ ,  $p\leq 0.001$ ), *C. dentata* ( $t=-17.32$ ,  $p\leq 0.001$ ) e *I. punctata* ( $t=-27.23$ ,  $p\leq 0.001$ ), e indican que la CC promedio en las tres especies de árboles tropicales fueron estadísticamente inferiores al 50 % establecido como factor de conversión respecto a la biomasa.

Las variaciones en la CC en las tres especies mostradas en nuestro estudio son similares a las registradas por Elias y Potvin (2003) para 32 especies tropicales de Panamá (44.4 a 49.4 %). Gayoso y Guerra (2005) midieron la CC en 16 especies de bosques nativos de Chile, y reportaron una variación de 34.9-48.3 % con

**Statistical analysis**

A three-factor ANOVA was carried out with the data to evaluate the effects of species, diametric category, and structural component in the CC and the interactions corresponding to the species. For the species factor three levels were considered (*A. latifolia*, *C. dentata* and *I. punctata*), the same as the diametrical category factor (CD I, CD II, CD III), and the structural component factor (stem, branches, leaves), grouping the data into a completely random design with factorial arrangement 3×3×3 with three repetitions. The Tukey test (p≤0.05) was used for the factors or interactions that presented significant differences. The assumptions of normality and homogeneity of variances were validated for the model through the Shapiro-Wilk and Levene test (Montgomery, 2012). In addition, the differences between the average CC from each species and the generic value of standard biomass conversion (50 %) (Basuki *et al.*, 2009; Houghton, 2005; Thomas and Martin, 2012) were evaluated statistically with a t-student test (p≤0.01). These analyses were performed with the R software version 3.3.3 (R Development Core Team, 2017) and with the *agricolae* package (De Mendiburu, 2016).

**RESULTS AND DISCUSSION**

**Carbon concentration per species**

The results from the laboratory showed that the CC in the three species was found in an interval of 44.13-48.70 %, with a general mean of 46.20 %. The CC was significantly different between species ( $F_{2, 54}=14.03$ ,  $p\leq 0.0001$ ). The species with the highest average CC was *C. dentata* with 46.71 %, and then *A. latifolia* (46.02 %), and *I. punctata*

**Cuadro 1. Concentración de carbono (CC) en tres especies de árboles tropicales.**

**Table 1. Carbon concentration (CC) in three species of tropical trees.**

Especie	n	Media	DE
<i>Alchornea latifolia</i>	27	46.02 b	1.13
<i>Cupania dentata</i>	27	46.71 a	0.99
<i>Inga punctata</i>	27	45.86 b	0.79
Media general	81	46.20	1.03

DE: Desviación estándar. Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; p≤0.05). ♦ DE: Standard deviation. Means with different letter in a column are statistically different (Tukey; p≤0.05).

un promedio de 43.7 %, mientras que Yeboah *et al.* (2014) reportaron la CC en un intervalo de 45.8-49.8 % en plantaciones de 19 especies de árboles tropicales de 7 a 12 años en dos ecozonas de Ghana. Figueroa *et al.* (2005) determinaron una mayor CC para la especie de *Inga* (51.16 %) y de 51.19 % para seis especies del bosque mesófilo de la Sierra Norte de Oaxaca México. Además, Becker *et al.* (2012) en 23 especies tropicales del Este de África señalan que la variación de la CC fue de 47.5-50 % con una media de 50 %. Hernández-Vázquez *et al.* (2012) reportaron una CC promedio de 40.8 % para la especie *Inga jinicuil* Schltdl. en los sistemas agroforestales de café en San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca, valor inferior al de *I. punctata* en nuestro estudio. Pompa-García *et al.* (2017a) encontraron que la CC en 82 especies de árboles en zonas tropicales y subtropicales de México fue de 42.8 a 44.3 %, valores inferiores a los registrados en nuestro estudio.

Las diferencias en la CC en los estudios y en las tres especies analizadas en nuestro estudio se atribuyen principalmente a las propiedades físicas y químicas de los tejidos del árbol (Thomas y Malczewski, 2007). La variación de la CC entre las especies de árboles tropicales es ocasionada por las diferentes proporciones de celulosa y lignina (Martin y Thomas, 2011). Además, en la mayoría de los estudios se ignoran los compuestos volátiles de C en la concentración total de C, lo que puede causar una subestimación significativa en el contenido de C total (Martin *et al.*, 2013). Así mismo, los efectos de los atributos ecológicos de las especies, como la tolerancia a la sombra, influyen de manera importante en la variación de la CC en los tejidos del árbol (Gao *et al.*, 2016). Los árboles con contenido alto de lignina tienden a presentar altos niveles de CC; así, las especies de coníferas tienen una mayor CC en la madera ( $50.8 \pm 0.7$  %) comparado con las especies de angiospermas tropicales ( $47.1 \pm 0.4$  %) (Thomas y Malczewski, 2007). De la misma manera, especies de árboles de zonas templadas/boreales presentan mayor variación de la CC (43.4-55.6 %) que las especies de zonas tropicales (41-51.6 %) (Thomas y Martin, 2012).

### Concentración de carbono por componente y categoría diamétrica

Los valores promedio de CC en los componentes estructurales del árbol en las tres especies fueron

(45.86 %) (Table 1). The results from the t-test were for *A. latifolia* ( $t = -18.32$ ,  $p \leq 0.001$ ), *C. dentata* ( $t = -17.32$ ,  $p \leq 0.001$ ) and *I. punctata* ( $t = -27.23$ ,  $p \leq 0.001$ ), indicating that the average CC in the three species of tropical trees was statistically lower than the 50 % established as a conversion factor with regard to the biomass.

The variations in the CC in the three species shown in our study are similar to the ones found by Elias and Potvin (2003) for 32 tropical species from Panama (44.4 to 49.4 %). Gayoso and Guerra (2005) measured the CC in 16 species of native forests from Chile, and reported a variation of 34.9-48.3 % with an average of 43.7 %, while Yeboah *et al.* (2014) reported the CC in an interval of 45.8-49.8 % in plantations of 19 species of tropical trees of 7 to 12 years in two ecozones of Ghana. Figueroa *et al.* (2005) determined a higher CC for the species of *Inga* (51.16 %) and of 51.19 % for six species from the mesophyll forest in the Sierra Norte of Oaxaca, México. In addition, Becker *et al.* (2012) point out that the variation of CC was 47.5-50 % in 23 tropical species in Eastern Africa, with a mean of 50 %. Hernández-Vázquez *et al.* (2012) reported an average CC of 40.8 % for the species *Inga jinicuil* Schltdl. in coffee agroforestry systems in San Juan Tepanzacoalco, Ixtlán, Oaxaca, value lower than that of *I. punctata* in our study. Pompa-García *et al.* (2017a) found that the CC in 82 species of trees in tropical and subtropical zones of México was 42.8 to 44.3 %, values lower than those found in our study.

The differences in the CC in the studies and in the three species analyzed in our study were attributed primarily to the physical and chemical properties of the tree tissues (Thomas and Malczewski, 2007). The variation in the CC between species of tropical trees is caused by the different proportions of cellulose and lignin (Martin and Thomas, 2011). In addition, in most of the studies the volatile compounds of C are unknown in the total concentration of C, which may cause a significant under estimation in the content of total C (Martin *et al.*, 2013). Likewise, the effects of the ecological attributes of the species, such as tolerance to shade, influence importantly the variation of CC in the tree tissues (Gao *et al.*, 2016). The trees with high content of lignin tend to present high levels of CC; thus, the species of conifers have a higher CC in the wood

45.77 %, 46.04 % y 46.77 % en el fuste, las ramas y las hojas, respectivamente (Cuadro 2). Mientras que la CC promedio en la CD I fue 45.84 %, 46.12 % en la CD II y 46.63 % en la CD III (Cuadro 3). Los resultados del análisis de varianza indicaron que la CC fue significativamente diferente entre componentes estructurales del árbol ( $F_{2,18}=18.74$ ,  $p\leq 0.001$ ) y entre categorías diamétricas ( $F_{2,18}=6.79$ ,  $p\leq 0.001$ ) en *I. punctata*. Así mismo, en *C. dentata* la CC mostró diferencias significativas entre los componentes estructurales ( $F_{2,18}=25.20$ ,  $p\leq 0.001$ ) y entre las clases diamétricas ( $F_{2,18}=8.79$ ,  $p\leq 0.001$ ). Mientras que en *A. latifolia* solo las clases diamétricas presentaron diferencias significativas ( $F_{2,18}=6.98$ ,  $p\leq 0.01$ ). La interacción componente estructural por clase diamétrica para las tres especies no mostró diferencias significativas ( $p>0.05$ ).

En *A. latifolia*, la CC fue 46.40 % en las ramas, 46.10 % en las hojas y 45.56 % en el fuste, pero sin diferencias significativas ( $p>0.05$ ). En cambio, la

( $50.8\pm 0.7$  %) compared to the species of tropical angiosperms ( $47.1\pm 0.4$  %) (Thomas and Malczewski, 2007). In the same way, tree species of temperate/boreal zones present a higher variation of CC (43.4-55.6 %) than the species from tropical zones (41-51.6 %) (Thomas and Martin, 2012).

**Carbon concentration by component and diametric category**

The average values of CC in the structural components of the tree in the three species were 45.77 %, 46.04 % and 46.77 % in the stem, the branches and the leaves, respectively (Table 2), while the average CC was 45.84 % in CD I, 46.12 % in CD II and 46.63 in CD III (Table 3). The results from the variance analysis indicated that the CC was significantly different between structural components of the tree ( $F_{2,18}=18.74$ ,  $p\leq 0.001$ ) and between diametrical categories ( $F_{2,18}=6.79$ ,

**Cuadro 2. Concentración de carbono (CC) en los diferentes componentes estructurales del árbol.**

**Table 2. Carbon concentration (CC) in the different structural components of the tree.**

Especie	Componente estructural		
	Fuste	Ramas	Hojas
<i>Alchornea latifolia</i>	45.56±0.88 a	46.40±0.75 a	46.10±1.55 a
<i>Cupania dentata</i>	46.29±0.70 a	46.11±0.55 a	47.71±0.80 b
<i>Inga punctata</i>	45.46±0.62 a	45.62±0.70 a	46.51±0.66 b
Media general	45.77±0.81 a	46.04±0.72 a	46.77±1.25 b

Media±desviación estándar, n=9. Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey;  $p\leq 0.05$ ). ❖ Mean±standard deviation, n=9. Means with different letters in a line are statistically different (Tukey;  $p\leq 0.05$ ).

**Cuadro 3. Concentración de carbono (CC) en las diferentes categorías diamétricas.**

**Table 3. Carbon concentration (CC) in the different diametric categories.**

Especie	Categoría diamétrica		
	CD I	CD II	CD III
<i>Alchornea latifolia</i>	46.00±1.03 ab	45.36±0.69 a	46.69±1.27 b
<i>Cupania dentata</i>	46.61±0.76 a	46.92±0.91 b	47.15±0.95 b
<i>Inga punctata</i>	45.38±0.58 a	45.83±0.84 ab	46.36±0.64 b
Media general	45.84±0.84 a	46.12±1.07 ab	46.63±1.05 a

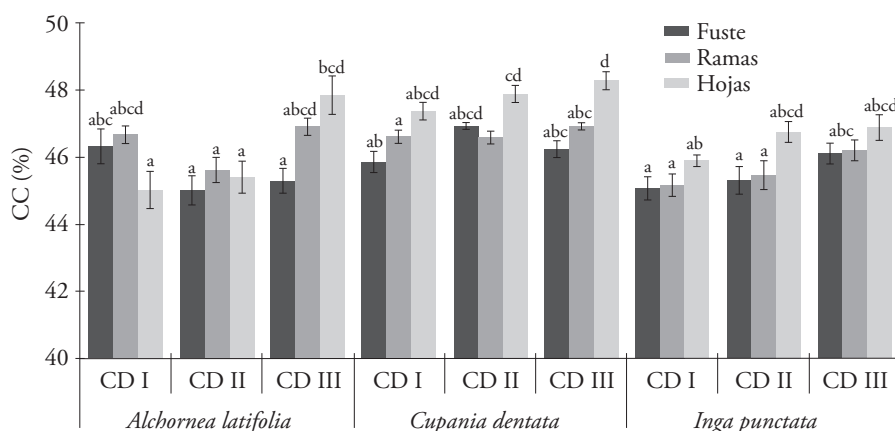
Media±desviación estándar, n=9. Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes (Tukey;  $p\leq 0.05$ ). ❖ Mean±standard deviation, n=9. Means with different letters in a line are statistically different (Tukey;  $p\leq 0.05$ ).

CC de las hojas (47.71 %) de *C. dentata* fue significativamente superior a la del fuste (46.11 %) y ramas (45.62 %) ( $p \leq 0.01$ ). Un comportamiento similar se observó en *I. punctata*: la CC fue significativamente mayor en las hojas con 46.51 % respecto a las ramas (45.62 %) y el fuste (45.46 %) ( $p \leq 0.01$ ). Los árboles con categorías diamétricas mayores a 20 cm (CD III) tuvieron valores más altos ( $p \leq 0.05$ ) en la CC que las CDI y CDII en las tres especies (Cuadro 3). La menor CC se presentó en el fuste de la CD I de *I. punctata* con 44.82 %, y la más alta en las hojas de la CD III de *C. dentata* con 47.72 %. Todos los valores de CC en los componentes estructurales y en las categorías diamétricas fueron inferiores al 50 % en las tres especies (Figura 1).

Los resultados obtenidos en la CC para en *I. punctata* tuvieron un comportamiento similar al del estudio realizado por Pompa-García *et al.* (2017a) para *Inga vera* Willd. en los bosques tropicales de México, con una mayor CC en las hojas (49 %) y 46 % de CC en el fuste; sin embargo, la CC en las ramas (44 %) fue menor a la determinada en nuestro estudio. Pompa-García *et al.* (2017) encontraron una mayor CC en el fuste (48 %) y ramas (47 %) en *Croton draco* Schltdl. & Cham., respecto a los de *A. latifolia*, y una menor CC en las hojas (39 %), aunque ambas especies pertenecen a la misma familia (Euphorbiaceae).

$p \leq 0.001$ ) in *I. punctata*. Likewise, in *C. dentata* the CC showed significant differences between the structural components ( $F_{2,18} = 25.20$ ,  $p \leq 0.001$ ) and between the diametric classes ( $F_{2,18} = 8.79$ ,  $p \leq 0.001$ ). Meanwhile, in *A. latifolia* only the diametric classes presented significant differences ( $F_{2,18} = 6.98$ ,  $p \leq 0.01$ ). The interaction structural component by diametric class for the three species did not show significant differences ( $p > 0.05$ ).

In *A. latifolia*, the CC was 46.40 % in the branches, 46.10 % in the leaves and 45.56 % in the trunk, although without significant differences ( $p > 0.05$ ). Instead, the CC from leaves (47.71 %) of *C. dentata* was significantly higher than that from the trunk (46.11 %) and branches (45.62 %) ( $p \leq 0.01$ ). A similar behavior was observed in *I. punctata*: the CC was significantly higher than the leaves with 46.51 %, compared to the branches (45.62 %) and the trunk (45.46 %) ( $p \leq 0.01$ ). The trees with diametric categories above 20 cm (CD III) had higher values ( $p \leq 0.05$ ) in the CC than the CDI and CDII in the three species (Table 3). The lowest CC was found in the stem of the CDI of *I. punctata* with 44.82 %, and the highest in the leaves of CD III of *C. dentata* with 47.72 %. All the values of CC in the structural components and in the diametric categories were lower than 50 % in the three species (Figure 1).



**Figura 1. Concentración de carbono (CC) promedio en el fuste, las ramas y las hojas en las diferentes categorías diamétricas (CD) para las tres especies de árboles tropicales. Los datos son medias  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ). Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas significativas (Tukey;  $p \leq 0.05$ ).**

**Figure 1. Average carbon concentration (CC) in the trunk, the branches and the leaves in the different diametric categories (DC) for the three species of tropical trees. The data are means  $\pm$  standard deviation ( $n=3$ ). Different letters in the bars indicate statistically significant differences (Tukey;  $p \leq 0.05$ ).**



Las tres especies mostraron la mayor CC en las hojas, después en las ramas y al final en el tronco (Cuadro 2). Esta variación se debe a que en las hojas hay una mayor acumulación de carbohidratos y las tasas más altas de compuestos volátiles (Watson y Casper, 1984; Yerena-Yamallel *et al.*, 2012). La madera en las ramas tiene una mayor concentración de lignina y extractos que la madera del fuste, lo cual resulta en una CC más alta (Bert y Danjon, 2006), mientras que el tronco contiene mayores concentraciones relativas de carbohidratos no estructurales (almidón y azúcares simples) (Hoch *et al.*, 2003).

Los árboles en las categorías diamétricas mayores (CD III) mostraron una mayor CC en las tres especies tropicales; estos patrones de cambios en el aumento de la CC dependientes al tamaño de árbol se observaron en otras especies de árboles tropicales, en Dominica y Panamá (Martin *et al.*, 2013; Martin y Thomas, 2013). En el proceso de crecimiento de los árboles, el contenido de lignina disminuye, y es compensada por el aumento de otros compuestos de C en la madera, como los compuestos volátiles y, en consecuencia, una mayor CC (Martin *et al.*, 2013). Además, el aumento de la CC debido al tamaño del árbol puede deberse a una mayor formación de madera de tensión en los árboles más grandes en respuesta al incremento de carga por la copa en los individuos de mayor tamaño (Du y Yamamoto, 2007).

Los resultados de nuestro estudio aportan información clave sobre la variación inter-intra específica de la CC y se deben considerar al cuantificar la captura y almacenes de C del bosque. Además, la incorporación de los valores de CC en los diferentes componentes estructurales del árbol y categorías diamétricas en las ecuaciones alométricas de biomasa para las tres especies tropicales (Aquino *et al.*, 2015) son una herramienta importante para mejorar escenarios de emisiones globales de C (Gao *et al.*, 2016).

## CONCLUSIONES

Los valores de concentración de carbono en los componentes estructurales del árbol obtenidos en las diferentes categorías diamétricas de las tres especies tropicales fueron inferiores al 50 %, que se usa como un estándar en el cálculo del contenido de carbono a partir de la biomasa. El componente estructural que mostró mayor concentración de carbono fue

The results obtained in CC for *I. punctata* had a similar performance to the study carried out by Pompa-García *et al.* (2017a) for *Inga vera* Willd. in the tropical forests of México, with a higher CC in the leaves (49 %) and 46 % of CC in the trunk; however, the CC in the branches (44 %) was lower than the one found in our study. Pompa-García *et al.* (2017) determined a higher CC in the trunk (48 %) and branches (47 %) in *Croton draco* Schltdl. & Cham., compared to the ones found in *A. latifolia*, and a lower CC in the leaves (39 %), although both species belong to the same family (Euphorbiaceae).

The three species showed the highest CC in the leaves, then in the branches and finally in the stem (Table 2). This variation is because in the leaves there is a higher accumulation of carbohydrates and the highest rates of volatile compounds (Watson and Casper, 1984; Yerena-Yamallel *et al.*, 2012). The wood in the branches has a higher concentration of lignin and extracts from the stem wood, which results in a higher CC (Bert and Danjon, 2006), while the stem contains higher relative concentrations of non-structural carbohydrates (starch and simple sugars) (Hoch *et al.*, 2003).

The trees in the higher diametric categories (CD III) showed a higher CC in the three tropical species; these patterns of changes in the increase of the CC dependent on the size of the tree were observed in other species of tropical trees, in Dominican Republic and Panama (Martin *et al.*, 2013; Martin and Thomas, 2013). In the process of tree growth, the content of lignin decreases, and is compensated by the increase in other compounds of C in the wood, such as volatile compounds and, as consequence, a higher CC (Martin *et al.*, 2013). In addition, the increase of CC due to the size of the tree can be because of a higher formation of tension wood in the larger trees in response to the increase of crown load in individuals of larger size (Du and Yamamoto, 2007).

The results from our study contribute key information about the inter-intra specific variation of CC and should be taken into account when quantifying the capture and storage of C in the forest. In addition, the incorporation of CC values in different structural tree components and diametric categories in allometric equations of biomass for the three tropical species (Aquino *et al.*, 2015) are

las hojas; y el fuste presentó el menor porcentaje medio en las tres especies. Los árboles con diámetros mayores a 20 cm registraron la mayor CC en todas las especies.

### AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para realizar los estudios de maestría y, de la misma manera, a todo el personal de la finca La Cabaña de Pluma Hidalgo, Oaxaca, por el apoyo brindado en la fase de campo.

### LITERATURA CITADA

- Aquino R., M., A. Velázquez M., J. F. Castellanos B., H. M. De los Santos P., y J. D. Etchevers B. 2015. Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia* 49: 299-314.
- Basuki, T. M., P. E. van Laake, A.K. Skidmore, and Y. A. Hussin. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland *Dipterocarp* forests. *For. Ecol. Manage.* 257: 1684-1694.
- Becker, G. S., D. Braun, R. Gliniars, and H. Dalitz. 2012. Relations between wood variables and how they relate to tree size variables of tropical African tree species. *Trees* 26: 1101-1112.
- Bert, D., and F. Danjon. 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). *For. Ecol. Manage.* 222: 279-295.
- De Mendiburu, F. 2016. *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*. R package version 1.2-4.
- Dlugokencky, E., and P. Tans. 2017. Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (Consulta: noviembre 2017).
- Du, S., and F. Yamamoto. 2007. An overview of the biology of reaction wood formation. *J. Integr. Plant Biol.* 49: 131-143.
- Dugan, A. J., R. Birdsey, S. P. Healey, Y. Pan, F. Zhang, G. Mo, J. Chen, C. W. Woodall, A. J. Hernandez, K. McCullough, J. B. McCarter, C. L. Raymond, and K. Dante-Wood. Forest sector carbon analyses support land management planning and projects: assessing the influence of anthropogenic and natural factors. *Climatic Change* 144: 207-220.
- Elias, M., and C. Porvin. 2003. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Can. J. For. Res.* 33: 1039-1045.
- Etchevers, J. D., C. M. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla, y R. M. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 p.
- Figueroa N., C. M., G. Ángeles P., A. Velázquez M., y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de la biomasa en un Bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. For.* 1: 105-112.

an important tool to improve scenarios of global C emissions (Gao *et al.*, 2016).

### CONCLUSIONS

The values of carbon concentration in the structural components of the tree obtained in the different diametric categories of the three tropical species were lower than 50 %, which is used as a standard in the calculation of the carbon content from the biomass. The structural component which showed a higher concentration of carbon was the leaves; and the trunk presented the lowest mean percentage in the three species. The trees with diameters larger than 20 cm showed the highest CC among all the species.

—End of the English version—



- Figueroa N., C. M., J. D. Etchevers B., A. Velázquez M., y M. Acosta M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoam.* 23: 57-64.
- Gao, B., A. R. Taylor, H. H. Y. Chen, and J. Wang. 2016. Variation in total and volatile carbon concentration among the major tree species of the boreal forest. *For. Ecol. Manage.* 375: 191-199.
- Gayoso A., J., y J. Guerra C. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26: 33-38.
- Hernández-Vásquez, E., G. Campos-Ángeles, J. Enríquez-Del Valle, G. Rodríguez-Ortiz, y V. Velasco-Velasco. 2012. Captura de carbono por Inga jinicuil Schltdl. En un sistema agroforestal de café bajo sombra. *Rev. Mex. Cienc. For.* 3: 11-21.
- Hernández-Vera, D., M. Pompa-García, J. I Yerena-Yamallel, y E. Alanís-Rodríguez. 2017. Within-tree carbon concentration variation in three Mexican pine species. *Bosque* 38: 381-386.
- Hoch, G., A. Richter, and C. Körner. 2003. Non-structural carbon compounds in temperate forest trees. *Plant, Cell and Environ.* 26: 1067-1081.
- Houghton, R.A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob. Change Biol.* 11: 945-958.
- INEGI. 2010. Compendio de información geográfica municipal Pluma Hidalgo Oaxaca. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>. (Consulta: enero 2017).
- IPCC. 2007. *Climate change 2007: A synthesis. Report Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, Switzerland. pp. 22.
- Martin, A. R., and S. C. Thomas. 2011. A reassessment of carbon content in tropical trees. *PloS one* 6: e23533.
- Martin, A. R., and S. C. Thomas. 2013. Size-dependent changes in leaf and wood chemical traits in two Caribbean rainforest trees. *Tree Physiol.* 33: 1338-1353.

- Martin, A. R., S. C. Thomas, and Y. Zhao. 2013. Size-dependent changes in wood chemical traits: a comparison of Neotropical saplings and large trees. *AoB PLANTS* 5: plt039.
- Montgomery, D. C. 2012. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 8th edition. 752 p.
- Pennington, T. D., y K. Sarukhán. 2005. *Manual para la Identificación de Campo de los Principales Árboles Tropicales de México*. Tercera ed. Inst. Nal. Invest. Forest. SAG. México. 523 p.
- Pompa-García, M., J. A. Sigala-Rodríguez, E. Jurado, and J. Flores. 2017a. Tissue carbon concentration of 175 Mexican forest species. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 10: 754-758.
- Pompa-García, M., J. A. Rodríguez, y E. Jurado, E. 2017b. Some tree species of ecological importance in Mexico: A documentary review. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambiente* 23: 185-219.
- Pompa-García, M., y J. I. Yerena-Yamallel. 2014. Concentración de carbono en *Pinus cembroides* Zucc: fuente potencial de mitigación del calentamiento global. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambiente* 20: 169-175.
- R Development Core Team. 2017. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Razo Z., R., A. J. Gordillo M., R. Rodríguez L., C. C Maycotte M., y O. A. Acevedo S. 2015. Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Rev. Mex. Cienc. For.* 6: 58-67.
- Tesfaye, M. A., A. Bravo-Oviedo, F. Bravo, and R. Ruiz-Peinado. 2016. Aboveground biomass equations for sustainable production of fuelwood in a native dry tropical afro-montane forest of Ethiopia. *Ann. For. Sci.* 73: 411-423.
- Thomas, S. C., and A. R. Martin. 2012. Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests* 3: 332-352.
- Thomas, S. C., and G. Malczewski. 2007. Wood carbon content of tree species in Eastern China: Interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *J. Environ. Manage.* 85: 659-662.
- Ventura-Aquino, Y., B. Rendón, S. Rebollar, and G. Hernández. 2008. Use and conservation of forest resources in the municipality of San Agustín Loxicha, Sierra Madre del Sur, Oaxaca, México. *Agrofor. Syst.* 73: 167-180.
- Villanueva-López, G., P. Martínez-Zurimendi, F. Casanova-Lugo, L. Ramírez-Avilés, and P. I. Montañez-Escalante. 2015. Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agrofor. Syst.* 89: 1083-1096.
- Watson, M.A., and B. B. Casper. 1984. Morphogenetic constraints on patterns of carbon distribution in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 15:233-258.
- Yeboah, D., A. J. Burton, A. J. Storer, and E. Opuni-Frimpong. 2014. Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests* 45: 35-52.
- Yerena-Yamallel, J. I., J. Jiménez-Pérez, O. A. Aguirre-Calderón, y E. J. Treviño-Garza. 2012. Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. *Bosque* 33:145-152.
- Zhang, Q. Z., C. Wang, X. Wang, and X. Quan. 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *For. Ecol. Manage.* 258: 722-727.