

Tree diversity and stored carbon in cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems in Soconusco, Chiapas, Mexico

Diversidad arbórea y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco Chiapas, México

Gicli M. Suárez-Venero¹; Carlos H. Avendaño-Arrazate²; Pablo A. Ruíz-Cruz²; Paulina Estrada-de los Santos³

¹Universidad de Guantánamo (UG). Av. Che Guevara, km 1.5 carretera Jamaica. C. P. 95100. Guantánamo, Cuba.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo experimental Rosario Izapa. km 18 carretera Tapachula-Cacahoatán. C. P. 30870. Tuxtla Chico, Chiapas, México.

³Instituto Politécnico Nacional (IPN), Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, col. Santo Tomás. C. P. 11340. Miguel Hidalgo, Ciudad de México, México.

*Corresponding author: avendano.carlos@inifap.gob.mx, tel.: +52 (962) 121 0383.

Abstract

Introduction: Cocoa (*Theobroma cacao* L.) yields in Chiapas, Mexico remain low, but can be improved with agroforestry designs that consider tree composition to ensure diversity and carbon sequestration.

Objective: To determine tree diversity and stored carbon at three elevational levels of cocoa agroforestry systems in Soconusco, Chiapas.

Materials and methods: Representative 50 x 20 m plots were established at three elevational levels (0 to 50 m, 51 to 100 m and ≥ 101 m). Species were counted and classified taxonomically. Diameter at breast height, height of each species, diversity, similarity between pairs of heights, and carbon storage were estimated.

Results and discussion: Richness was 35 tree species selected by the producers to shade the cocoa crop. These were grouped into 32 genera and 22 families. Abundance was 199 trees, with abundance per plot and diversity being the highest at ≥ 101 m. Lower diversity was associated with heights with less equity between abundance and richness. Carbon stored in aerial biomass ranged from 224.9 to 362.1 Mg·ha⁻¹; the amount was highest at lower elevations (0 to 50 m).

Conclusions: Agroforestry systems had medium to high diversity. Species distribution, by elevational level, responds to the interests of the producers and to the composition of the natural forest. The amount of stored carbon was high, due to the abundance, richness and dominance of the species.

Keywords: Elevational level; species richness; tree composition; carbon sequestration; shade trees.

Resumen

Introducción: Los rendimientos de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Chiapas, México, aún son bajos, pero pueden ser mejorados con diseños agroforestales que consideren la composición arbórea para garantizar la diversidad y captura de carbono.

Objetivo: Determinar la diversidad arbórea y el carbono almacenado en tres niveles altitudinales de sistemas agroforestales con cacao en el Soconusco, Chiapas.

Materiales y métodos: Se establecieron parcelas representativas de 50 x 20 m en tres niveles altitudinales (0 a 50 m, 51 a 100 m y ≥ 101 m). Las especies se contabilizaron y clasificaron taxonómicamente. Se estimaron el diámetro a la altura del pecho, la altura de cada especie, la diversidad y similitud entre pares de alturas, así como el almacenamiento de carbono.

Resultados y discusión: La riqueza fue de 35 especies arbóreas seleccionadas por los productores para sombra del cultivo de cacao. Estas se agruparon en 32 géneros y 22 familias. La abundancia fue de 199 árboles; la abundancia por parcela y diversidad fueron mayores en la altura ≥ 101 m. La menor diversidad estuvo asociada a las alturas con menor equidad entre abundancia y riqueza. El carbono almacenado en la biomasa aérea varió de 224.9 a 362.1 Mg·ha⁻¹; la cantidad fue superior a más baja altura (0 a 50 m).

Conclusiones: Los sistemas agroforestales presentaron diversidad media a alta. La distribución de las especies, por nivel altitudinal, responde a los intereses de los productores y a la composición del bosque natural. La cantidad de carbono almacenado fue alta, debido a la abundancia, riqueza y dominancia de las especies.

Palabras clave: Nivel altitudinal; riqueza de especies; composición arbórea; captura de carbono; árboles de sombra.

Introduction

The states of Tabasco and Chiapas are the most important producers of cocoa (*Theobroma cacao* L.) in Mexico. In Chiapas, the main production regions are the North, Central, Soconusco and Selva-Norte areas, with average yields ranging from 0.20 to 0.54 t·ha⁻¹ (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018); some of the factors involved in yields are plant health and climate change.

The global climate is changing due to a progressive increase in concentrations of greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO₂), whose emissions increase every year and contribute to a global increase in temperature (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007). Land-use change, deforestation, and massive use of fossil fuels for industrial purposes and transport are the main factors that induce these emissions (Useros, 2013) and affect human health, food security and natural ecosystems (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2009; Eguren, 2004; IPCC, 2007). Climate change could be mitigated by establishing agroforestry systems (AFS) capable of capturing CO₂ from the atmosphere and storing it in aerial and underground biomass for long periods (Gayoso & Guerra, 2005). In this regard, Shibu (2009), Schoeneberger (2009), and Casanova, Caamal, Petit, Solorio, and Castillo (2010) support the fact that AFSs, even if not designed primarily for carbon sequestration, offer an opportunity to increase carbon stocks in the Earth's biosphere.

Most cocoa plantations in the world are established with shade tree species, in some cases under an agroforestry management design. In this context, some authors recognize the need to grow cocoa under shade (Almeida & Valle, 2007; Silva, Orozco, Rayment, & Somarriba, 2013; Somarriba & Quesada, 2005). Therefore, it is necessary to achieve a tree composition for shade within cocoa AFSs, where forest species are arranged in such a way that they allow the entry of light according to the requirements of the crop and positively influence carbon storage.

In Mexico, some studies have been carried out on tree composition in the AFSs of Soconusco, Chiapas (Roa-Romero, Salgado-Mora, & Álvarez-Herrera, 2009; Salgado-Mora, Ibarra, Macías-Sámamo, & López-Báez, 2007) and in Tabasco (Ramírez, García, Obrador, Ruiz, & Camacho, 2013); however, such research does not allude to the influence of this tree composition on carbon storage. Therefore, the objective of this research was to determine the tree diversity and stored carbon at three elevational levels in cocoa AFSs in Soconusco, Chiapas, Mexico. The information generated will allow producers to adopt shade management alternatives at the plantations in order to improve the sustainability of these agroecosystems.

Introducción

Los estados de Tabasco y Chiapas son los productores más importantes de cacao (*Theobroma cacao* L.) en México. En Chiapas, las principales regiones de producción son el Norte, Centro, Soconusco y Selva-Norte con rendimiento promedio que oscila entre 0.20 a 0.54 t·ha⁻¹ (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018); algunos de los factores que intervienen en el rendimiento son el sanitario y el cambio climático.

El clima global está cambiando debido a un aumento progresivo de las concentraciones de gases efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), cuyas emisiones aumentan cada año y contribuyen a un incremento global de la temperatura (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2007). El cambio de uso de la tierra, la deforestación, el uso masivo de combustibles fósiles con fines industriales y el transporte son los principales factores que inducen dichas emisiones (Useros, 2013) y que afectan la salud humana, la seguridad alimentaria y los ecosistemas naturales (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2009; Eguren, 2004; IPCC, 2007). El cambio climático podría mitigarse mediante el establecimiento de sistemas agroforestales (SAF) capaces de capturar el CO₂ de la atmósfera y almacenarlo en la biomasa aérea y subterránea por largos periodos (Gayoso & Guerra, 2005). En este sentido, Shibu (2009), Schoeneberger (2009), y Casanova, Caamal, Petit, Solorio, y Castillo (2010) fundamentan el hecho de que los SAF, incluso si no están diseñados principalmente para el secuestro de carbono, ofrecen una oportunidad para aumentar las reservas de carbono en la biosfera terrestre.

La mayor parte de las plantaciones de cacao en el mundo se encuentra establecida con especies de árboles de sombra, en algunos casos bajo un diseño de manejo agroforestal. En este contexto, algunos autores reconocen la necesidad de cultivar el cacao bajo sombra (Almeida & Valle, 2007; Silva, Orozco, Rayment, & Somarriba, 2013; Somarriba & Quesada, 2005). Por ello, es necesario lograr una composición arbórea para sombra dentro de los SAF de cacao, donde las especies forestales estén dispuestas de tal forma que permitan la entrada de luz según los requerimientos del cultivo y que influyan positivamente en el almacenamiento del carbono.

En México se han desarrollado algunos trabajos sobre la composición arbórea en los SAF del Soconusco, Chiapas (Roa-Romero, Salgado-Mora, & Álvarez-Herrera, 2009; Salgado-Mora, Ibarra, Macías-Sámamo, & López-Báez, 2007) y en Tabasco (Ramírez, García, Obrador, Ruiz, & Camacho, 2013); sin embargo, tales investigaciones no hacen alusión a la influencia de esa composición

Materials and methods

Description of the study area

The research was carried out during the first half of 2018 in three elevational zones that grouped 13 of the 15 municipalities of the Soconusco region, located in the south of the state of Chiapas, Mexico, between coordinates 15° 19' NL and 92° 44' WL covering 4605.4 km², which represents 6.28 % of the State area.

Climates in the region are warm and semi-warm; warm sub-humid weather predominates with summer rains, followed by warm humid weather with abundant summer rains. Therefore, according to the Köppen classification modified by García (1973), the predominant climate is type Aw₂(w)Ig with average relative humidity of 79.4 % and average annual temperature of 26.8 °C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015). The Soconusco region and its coastal plain has eight soil types: Litosol, Acrisol, Regosol, Solonchak, Andosol, Luvisol, Nitosol and Cambisol (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2015). However, in cocoa production areas, the predominant soils are generally Andosol, Cambisol and Luvisol.

Sampling

An exploratory tour was carried out and interviews were conducted with the producers in 90 % of the cocoa plantations in each municipality of the Soconusco region, to determine the sampling areas. From this tour, the elevational ranges to be studied, the criteria for the selection of the municipalities to be examined, and the productive entities (farms) to be evaluated were defined.

The selection criteria of the municipalities were chosen based on the representativeness at the State level: 1) area planted with cocoa; 2) number of producers; 3) contribution to production (%); and 4) geographical representativeness by elevational levels (from 0 to 500 m).

The tour identified that the largest area of cocoa plantations is at elevations below 150 m, which ensured representativeness by selecting the largest number of farms at low elevations; therefore, the following elevational levels were defined: 0 to 50 m, 51 to 100 m and ≥101 m, consisting of seven, three and three farms, respectively (Table 1).

Response variables

Tree composition

Sampling was carried out in 13 plots of 20 m x 50 m (1000 m²) corresponding to one plot per municipality,

arbórea en el almacenamiento de carbono. Por ello, el objetivo de esta investigación fue determinar la diversidad arbórea y el carbono almacenado de tres niveles altitudinales en SAF con cacao en el Soconusco, Chiapas, México. La información generada permitirá a los productores adoptar alternativas en el manejo de la sombra en las plantaciones, para mejorar la sostenibilidad de estos agroecosistemas.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

La investigación se desarrolló durante el primer semestre del año 2018 en tres zonas altitudinales que agruparon a 13 de los 15 municipios de la región Soconusco. Esta región se encuentra ubicada en el sur del estado de Chiapas, México, entre las coordenadas 15° 19' LN y 92° 44' LW cubriendo 4605.4 km² que representan 6.28 % de la superficie estatal.

Los climas en la región son cálidos y semicálidos; predomina el clima cálido subhúmedo con lluvias de verano, seguido por el clima cálido húmedo con lluvias abundantes de verano. Por tanto, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1973), el clima predominante es del tipo Aw₂(w)Ig con humedad relativa media de 79.4 % y temperatura media anual de 26.8 °C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015). La región del Soconusco y su planicie costera presenta ocho tipos de suelo: Litosol, Acrisol, Regosol, Solonchak, Andosol, Luvisol, Nitosol y Cambisol (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2015). No obstante, en las zonas de producción de cacao, por lo general, los suelos predominantes son el Andosol, Cambisol y Luvisol.

Muestreo

Se realizó un recorrido exploratorio y se hicieron entrevistas a los actores directos de la producción en 90 % de las plantaciones de cacao en cada municipio de la región del Soconusco, para determinar las zonas de muestreo. A partir de este recorrido se definieron los rangos altitudinales a estudiar, los criterios para la selección de los municipios objeto de intervención, y las entidades productivas (fincas) a evaluar.

Los criterios de selección de los municipios se eligieron en función de la representatividad a nivel estatal: 1) superficie plantada con el cultivo de cacao; 2) cantidad de productores; 3) aporte a la producción (%); y 4) representatividad geográfica por niveles de altitud (desde 0 hasta 500 m).

El recorrido permitió identificar que la mayor superficie de las plantaciones de cacao se encuentra en alturas por debajo de los 150 m, lo que garantizó

representing a total sampling area of 1.3 ha. In each plot, an inventory was made of the shade species present and the common name of each tree was recorded for taxonomic identification at the family, genus and species level, based on the manual of Central American trees (Barrance et al., 2003) and tropical trees of Mexico (Pennington & Sarukhán, 2005). The basal area of each tree was obtained from the diameter measured at breast height (DBH: 1.3 m above ground level) with a 5 m diameter tape and from the height obtained with a clinometer (SSUNTO brand).

The tree composition and structure of the plots were evaluated at all three heights, by means of the importance value index (IVI) according to Curtis and McIntosh (1951), from the relative density per unit area, the relative basal area and the relative frequency of species, using the equation $IVI = \text{relative density} + \text{relative dominance} + \text{relative frequency}$. To ensure homogeneity of information, abundance and richness calculations were made per plot at each elevational level.

representatividad al seleccionar la mayor cantidad de fincas a bajas alturas; por lo tanto, se definieron los siguientes niveles altitudinales: 0 a 50 m, 51 a 100 m y ≥ 101 m, compuestas por siete, tres y tres fincas, respectivamente (Cuadro 1).

Variables de respuesta

Composición arbórea

Se realizó un muestreo en 13 parcelas de 20 m x 50 m (1000 m²) correspondiendo a una parcela por municipio, que representa un área total de muestreo de 1.3 ha. En cada parcela se realizó un inventario de las especies de sombra presentes y se registró el nombre común de cada árbol para su identificación taxonómica a nivel de familia, género y especie, con base en el manual de árboles de Centroamérica (Barrance et al., 2003) y árboles tropicales de México (Pennington & Sarukhán, 2005). El área basal de cada árbol se obtuvo a partir del diámetro medido a la altura del pecho

Table 1. Locations and heights evaluated in the cocoa agroforestry system in the Soconusco region, Chiapas.
Cuadro 1. Localidades y alturas evaluadas en el sistema agroforestal con cacao en la región Soconusco, Chiapas.

Municipalities/ Municipios	Locations/ Localidades	Coordinates X/ Coordenadas X	Coordinates Y/ Coordenadas Y	Elevation (m)/ Altitud (m)
Height 1 (0-50 m)/Altura 1 (0-50 m)				
Huehuetán	Rancho Esquipulas	559941	1657255	17
Suchiate	Manuel Ávila Camacho	582086	1618980	19
Huixtla	El Arenal	554524	1666228	19
Mapastepec	La Fronterita	514271	1700423	29
Tuzantán	Tercer Cantón	558966	1669483	33
Acapetahua	Rancho San Antonio	530773	1692492	34
Escuintla	El Triunfo	544935	1697062	36
Height 2 (51-100 m)/Altura 2 (51-100 m)				
Tapachula	Raymundo Enriquez	571924	1643444	60
Frontera Hidalgo	La Primavera	587577	1635447	83
Metapa	Los Cacahuatales	586045	1637418	91
Height 3 (≥ 101 m)/Altura 3 (≥ 101 m)				
Acacoyagua	Los Cacaos	536672	1701221	398
Tuxtla Chico	C. E. Rosario Izapa	590658	1655363	433
Cacahoatán	Santa Martha	586167	1658130	500

Diversity and similarity analysis

The diversity of species, genera and families of plants associated with the cocoa AFS at the three selected elevations was analyzed by calculating the Shannon and Simpson indices. For the former, the following equation was used:

$$H' = -\sum p_i (\ln p_i)$$

$$p_i = n_i/n$$

where,

H' = Shannon index

n_i = number of trees of the i^{th} species

n = total number of trees of all species

$\sum p_i$ = proportional abundance of the i^{th} species.

For the Simpson index (D), the following equation was used:

$$D = \sum p_i^2$$

where,

p_i = proportion of trees of each species relative to the total.

To convert this probability to a measure of diversity, the complement to Simpson's original measure was used:

$$1 - D = 1 - \sum p_i^2$$

The similarity between pairs of heights was analyzed with the Jaccard coefficient and the Czekanowski-Sørensen method, qualitative methods explained by Polo (2008). The Jaccard coefficient (C_j) is based on the presence-absence ratio between the number of species in each system and the total number of species (Stiling, 1999), given by the following equation:

$$C_j = \frac{C}{A + B - C}$$

where,

A = number of species found in system A

B = number of species found in system B

C = number of species common to both systems.

On the other hand, the Czekanowski-Sørensen method is also based on the presence-absence ratio between the number of species shared or not in each system and the total number of species of the two sites under comparison. The following equation was used:

$$\frac{2C}{S_1 + S_2}$$

where,

C = number of species shared between the two sites

(DAP: 1.3 m sobre el nivel del suelo) medido con una cinta diamétrica de 5 m y de la altura obtenida con un clinómetro (marca SSUNTO).

La composición arbórea y la estructura de las parcelas se evaluaron en las tres alturas, mediante el índice de valor de importancia (IVI) según Curtis y McIntosh (1951), a partir de la densidad relativa por unidad de área, del área basal relativa y de la frecuencia relativa de especies, con el uso de la ecuación $IVI = \text{densidad relativa} + \text{dominancia relativa} + \text{frecuencia relativa}$. Para garantizar la homogeneidad de la información, los cálculos de abundancia y riqueza se calcularon por parcela en cada nivel altitudinal.

Análisis de la diversidad y similitud

La diversidad de especies, géneros y familias de plantas, asociada al SAF de cacao en las tres alturas seleccionadas, se analizó mediante el cálculo de los índices Shannon y Simpson. Para el primero se utilizó la siguiente ecuación:

$$H' = -\sum p_i (\ln p_i)$$

$$p_i = n_i/n$$

donde,

H' = índice de Shannon

n_i = número de árboles de la i -ésima especie

n = número total de árboles de todas las especies

$\sum p_i$ = abundancia proporcional de la i -ésima especie.

Para el índice de Simpson (D) se utilizó la siguiente ecuación:

$$D = \sum p_i^2$$

donde,

p_i = proporción de árboles de cada especie respecto al total.

Para convertir esta probabilidad a una medida de diversidad, se usó el complemento de la medida original de Simpson:

$$1 - D = 1 - \sum p_i^2$$

La similitud entre pares de alturas se analizó con el coeficiente de Jaccard y el método de Czekanowski-Sørensen, métodos cualitativos explicados por Polo (2008). El coeficiente de Jaccard (C_j) se basa en la relación de presencia-ausencia entre el número de especies en cada sistema y el número total de especies (Stiling, 1999), dado por la siguiente ecuación:

$$C_j = \frac{C}{A + B - C}$$

S1 = number of species at site 1

S2 = number of species at site 2.

Similarity was evaluated with the Morisita-Horn quantitative method, which considers the values of the species shared or not between the two sites under comparison and reflects the similarity of two sites in structure, both in composition and relative abundance.

For this, the following equation was used:

$$\frac{2\sum(nia * nib)}{(da + db) * (Na * Nb)}$$

where,

nia = number of trees of species *i* at site a

nib = number of trees of species *i* at site b

Na = number of trees at site a

Nb = number of trees at site b

For site a:

$$da = \frac{\sum nia^2}{N^2a}$$

For site b:

$$db = \frac{\sum nib^2}{N^2b}$$

Stored carbon

Stored carbon (Mg·ha⁻¹) was determined using the rapid estimation methodology proposed by Segura and Andrade (2008). Only species recorded with DBH_{1.3m} ≥ 10 cm at each of the studied heights were considered. The species were classified by type of DBH every 5 cm and compared with the tabulated storage values proposed in this methodology for the conditions of cocoa AFSs. The stored carbon values by DBH type were added to a land-use constant for cocoa (17.2). The final carbon storage values were classified by low, medium and high levels, according to the classification of Somarriba, Andrade, Segura, and Villalobos (2008), expressed in the methodology itself.

Statistical analysis

The recorded species data were systematized in a database created with the Excel version 9.1 package, where the frequency and average of species were calculated. With the information originating from the number of trees per species and the abundance to determine the diversity indices, an analysis was made with Fisher's least significant differences (LSD) test at $P \leq 0.05$. The means were compared by multiple range contrast with the statistical package STATGRAPHICS plus version 5.1 (Batanero & Díaz, 2008).

donde,

A = número de especies encontradas en el sistema A

B = número de especies encontradas en el sistema B

C = número de especies comunes a ambos sistemas.

Por otra parte, el método de Czekanowski-Sørensen se basa también en la relación presencia-ausencia entre el número de especies compartidas o no en cada sistema y el número total de especie de los dos sitios en comparación. Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{2C}{S1 + S2}$$

donde,

C = número de especies compartidas entre los dos sitios

S1 = número de especies en el sitio 1

S2 = número de especies en el sitio 2

La similitud se evaluó con el método cuantitativo de Morisita-Horn, que considera los valores de las especies compartidas o no entre los dos sitios en comparación, y significa la similitud de dos sitios en estructura tanto en composición como en abundancia relativa.

Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{2\sum(nia * nib)}{(da + db) * (Na * Nb)}$$

donde,

nia = número de árboles de la especie *i* en el sitio a

nib = número de árboles de la especie *i* en el sitio b

Na = número de árboles en el sitio a

Nb = número de árboles en el sitio b

Para el sitio a:

$$da = \frac{\sum nia^2}{N^2a}$$

Para el sitio b:

$$db = \frac{\sum nib^2}{N^2b}$$

Carbono almacenado

El carbono almacenado (Mg·ha⁻¹) se determinó con la metodología de estimación rápida propuesta por Segura y Andrade (2008). Para ello, se consideraron solo las especies registradas con DAP_{1.3m} ≥ 10 cm en cada una de las alturas estudiadas. Las especies se clasificaron por tipos de DAP cada 5 cm y se compararon con los valores tabulados de almacenamiento que se propone en dicha metodología para las condiciones de los SAF con cacao. Los valores de carbono almacenado por tipo de DAP fueron sumados con una constante de uso

Results

Tree composition

Table 2 shows the 35 tree species selected by producers for shade in cocoa agroforestry plantations in Soconusco, Chiapas. The species were grouped into 32 genera and 22 families. The most represented genera were *Citrus* (8.5 %) and *Tabebuia* (5.71 %), which together accounted for 25.12 % of the trees (199 in total). The most represented families were Fabaceae, Moraceae and Rutaceae with four, three and three species, respectively, followed by Apocynaceae, Bignoniaceae, Euphorbiaceae, Malvaceae, Meliaceae and Sapotaceae with two species each. These families grouped 54.1 % of the inventoried species.

A richness of 35 species was determined at all three elevations. The greatest richness was found at the elevation of ≥ 101 m with a total record of 21 species which meant, on average, seven species per plot, represented by the families Boraginaceae and Apocynaceae, followed by the elevation between 0 and 50 m with 26 species (on average 3.72 species per plot) represented mainly by the families Boraginaceae, Sapotaceae and Meliaceae; the lowest richness was recorded at elevations between 51 and 100 m with six species in total, averaging two species per plot represented by four families, among them Boraginaceae.

Regarding species abundance, a total of 199 trees were determined in the three elevations combined; 101 trees were recorded within the elevational range from 0 to 50 m, representing 14.42 trees per plot; 47 trees were recorded at the elevational level between 51 and 100 m, representing 15.66 trees per plot, and 51 trees were recorded at heights greater than 101 m, averaging 17 trees per plot. According to Figure 1, the laurel (*Cordia alliodora* [Ruiz & Pav.] Oken), pink poui (*Tabebuia rosea* [Bertol.] DC.) and mamey sapote (*Pouteria sapota* [Jacq.] H. E. Moore & Stearn.) were the most abundant species with 29, 26 and 23 trees, respectively. Of the recorded species, 13 had low abundance with only one tree; of these, eight were found mostly located at the lowest elevational level (0 to 50 m). However, the most abundant species were recorded at all three elevations.

Regarding the IVI, the families Boraginaceae, Fabaceae, Sapotaceae and Meliaceae were among the five most important, which were represented by species located in at least two of the heights studied. The family Boraginaceae was represented by high IVI species at the three elevational levels, which suggests that they are successful taxa with species capable of developing in different environments and heights (Figure 2). In contrast, the family Fabaceae was not represented by any higher IVI species, but it did have species with a

del suelo para el cacao (17.2). Los valores finales de almacenamiento de carbono se clasificaron por niveles bajo, medio y alto, según la clasificación de Somarriba, Andrade, Segura, y Villalobos (2008), expresados en la propia metodología.

Análisis estadístico

Los datos del registro de las especies se sistematizaron en una base de datos creada con el paquete de Excel versión 9.1, donde se calculó la frecuencia y promedio de especies. Con la información originada del número de árboles por especie y la abundancia para determinar los índices de diversidad, se hizo un análisis con las mínimas diferencias significativas entre las medias de Fisher (LSD) para un nivel de $P \leq 0.05$. Las medias se compararon por contraste múltiple de rangos con el paquete estadístico STATGRAPHICS plus versión 5.1 (Batanero & Díaz, 2008).

Resultados

Composición arbórea

El Cuadro 2 muestra las 35 especies arbóreas seleccionadas por los productores para sombra en las plantaciones agroforestales de cacao en el Soconusco, Chiapas. Las especies se agruparon en 32 géneros y 22 familias. Los géneros más representados fueron *Citrus* (8.5 %) y *Tabebuia* (5.71 %), que en conjunto concentraron 25.12 % de los árboles (199 en total). Las familias más representadas fueron Fabaceae, Moraceae y Rutaceae con cuatro, tres y tres especies, respectivamente; seguidas de Apocynaceae, Bignoniaceae, Euphorbiaceae, Malvaceae, Meliaceae y Sapotaceae con dos especies cada una. Estas familias agruparon 54.1 % de las especies inventariadas.

Se determinó una riqueza de 35 especies en las tres altitudes. La mayor riqueza se encontró en la altitud ≥ 101 m con un registro total de 21 especies que significó, en promedio, siete especies por parcela, representadas por las familias Boraginaceae y Apocynaceae, seguido por la altitud entre 0 y 50 m con 26 especies (en promedio 3.72 especies por parcela) representadas principalmente por las familias Boraginaceae, Sapotaceae y Meliaceae; la menor riqueza se registró en altitudes entre 51 y 100 m con seis especies en total con promedio de dos especies por parcela, representadas con cuatro familias, entre ellas Boraginaceae.

Respecto a la abundancia de especies, se determinó un total de 199 árboles en las tres altitudes; 101 árboles se registraron en las altitudes de 0 a 50 m, lo que representó 14.42 árboles por parcela; en el nivel altitudinal entre 51 a 100 m se registraron 47 árboles que representaron 15.66 árboles por parcela, y en alturas mayores de 101 m se registraron 51 árboles con promedio de 17

Table 2. Species used as shade in cocoa cultivation in 13 sampled municipalities of Soconusco, Chiapas.**Cuadro 2. Especies utilizadas como sombra en el cultivo del cacao en 13 municipios muestreados del Soconusco, Chiapas.**

Family/Familia	Species/Especie	Common name/ Nombre común	Uses/Usos
Anacardiaceae	<i>Mangifera indica</i> L.	Mango	Fruit/Frutal
Apocynaceae	<i>Aspisperma megalocarpon</i> Müll. Arg	Chiche	Timber/Maderable
Apocynaceae	<i>Stemmadenia donnell-smithii</i> (Rose) Woodson	Chapón	Timber/Maderable
Bignoniaceae	<i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose	Spring/Primavera	Timber/Maderable
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.	Pink poui/Roble	Timber/Maderable
Boraginaceae	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	Laurel	Timber/Maderable
Bombacaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Kapok/Ceiba	Timber/Maderable
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Gumbo-limbo/Jiote	Timber/Maderable
Cecropiaceae	<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	Trumpet tree/Guarumo	Other uses/Otros usos
Chrysobalanaceae	<i>Couepia polyandra</i> (Kunth) Rose	Ram/Carnero	Timber/Maderable
Combretaceae	<i>Terminalia amazonia</i> (J. F. Gmel.) Exell	Guavo/Guayabo volador	Timber/Maderable
Clusiaceae	<i>Garcinia humilis</i> (Vahl) C. D. Adams	Achachayru/Achachayrú	Fruit/Frutal
Euphorbiaceae	<i>Sapium macrocarpum</i> Müll. Arg	Chonte	Timber/Maderable
Euphorbiaceae	<i>Hippomane mancinella</i> L.	Manchineel/Manzanillo	Timber/Maderable
Fabaceae	<i>Inga micheliana</i> Harms	Chalum	Timber/Maderable
Fabaceae	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S. F. Blake	Zope	Timber/Maderable
Fabaceae	<i>Poeppigia procera</i> C. Presl	Tepemistle	Timber/Maderable
Fabaceae	<i>Erythrina fusca</i> Lour	Whistle/Pito	Other uses/Otros usos
Lauraceae	<i>Persea americana</i> Mill.	Avocado/Aguacate	Fruit/Frutal
Malvaceae	<i>Chiranthodendron pentadactylon</i> Larreat	Canaque	Timber/Maderable
Malvaceae	<i>Theobroma bicolor</i> Humb. & Bonpl	Pate/Pataste	Fruit/Frutal
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i> L.	Spanish cedar/Cedro	Timber/Maderable
Meliaceae	<i>Guarea glabra</i> Vahl.	Cedrillo	Timber/Maderable
Moraceae	<i>Castilla elastica</i> Sesse	Panama rubber tree/Hule	Timber/Maderable
Moraceae	<i>Ficus</i> sp. L.	Kill stick/Mata palo	Other uses/Otros usos
Moraceae	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) Steud	Old fustic/Mora blanco	Timber/Maderable
Muntingiaceae	<i>Muntingia calabura</i> L.	Capulin/Capulín	Other uses/Otros usos
Rutaceae	<i>Citrus nobilis</i> Lour	Tangor/Mandarina	Fruit/Frutal
Rutaceae	<i>Citrus sinensis</i> L.	Orange/Naranja	Fruit/Frutal
Rutaceae	<i>Citrus aurantifolia</i> Swingle	Key lime/Limón	Fruit/Frutal
Sapindaceae	<i>Nephelium lappaceum</i> L.	Rambutan/Rambután	Fruit/Frutal
Sapotaceae	<i>Manilkara zapota</i> (L.) van Royen	Sapodilla/Chicozapote	Fruit/Frutal
Sapotaceae	<i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H. E. Moore & Stearn	Mamey sapote/Zapote	Fruit/Frutal
Sterculiaceae	<i>Sterculia apelata</i> (Jacq.) Karst	Panama tree/Castaño	Timber/Maderable
Tiliaceae	<i>Apeiba tibourbou</i> Aubl.	Mico comb/Peine de Mico	Timber/Maderable

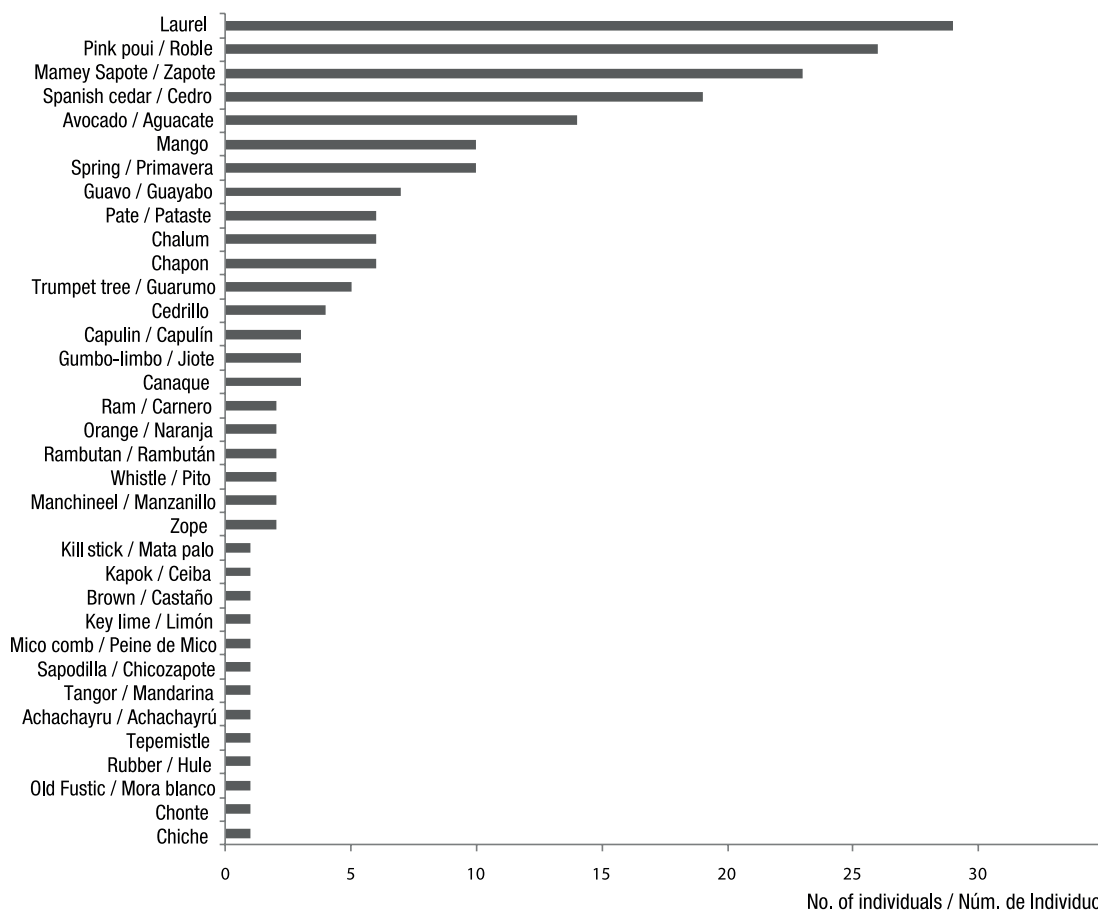


Figure 1. Distribution pattern of species abundance in cocoa agroforestry systems in Soconusco, Chiapas.

Figura 1. Patrón de distribución de la abundancia de especies en sistemas agroforestales de cacao en el Soconusco, Chiapas.

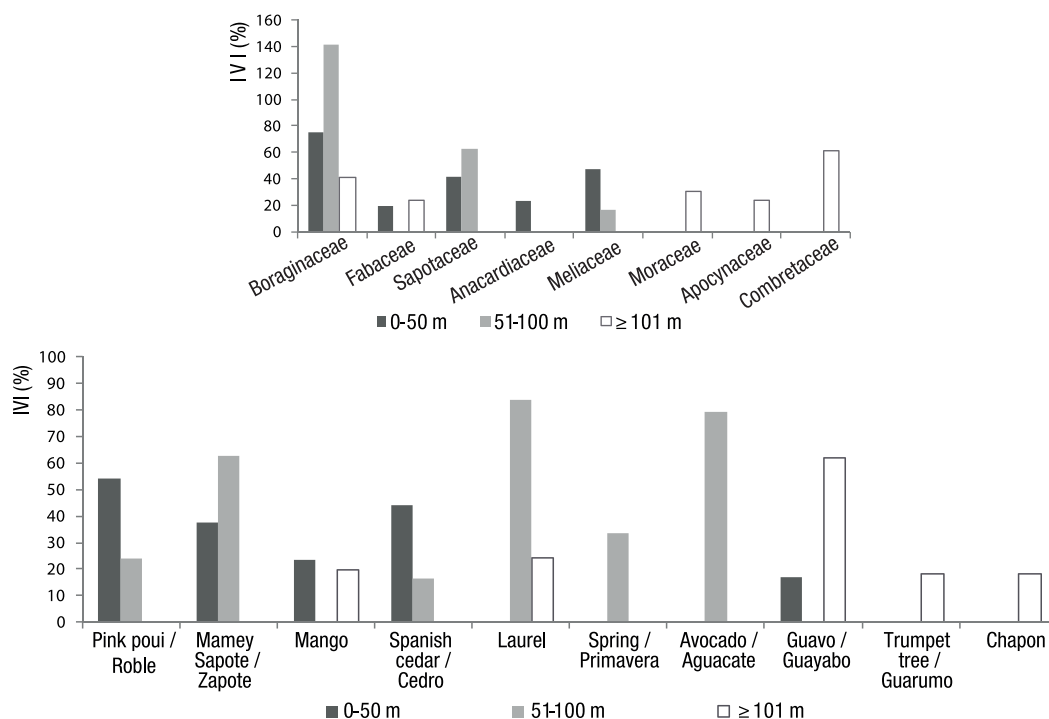


Figure 2. Most important families and species at three elevational levels in Soconusco, Chiapas. IVI: importance value index.

Figura 2. Familias y especies más importantes en tres niveles altitudinales del Soconusco, Chiapas. IVI: índice de valor de importancia.

lower IVI, such as the zope (*Schizolobium parahyba* [Vell.] S. F. Blake) and chalum (*Inga micheliana* Harms), at two elevational levels.

Unlike the analysis carried out in the families, no important species were recorded developing at the same time at all three height levels, only in two of them (Figure 2). However, some species were found at all three heights, but with lesser or greater importance in one or the other; such is the case of laurel, primavera, mamey sapote, Spanish cedar (*Cedrela odorata* L.) and avocado (*Persea americana* Mill.).

Diversity

Table 3 shows that the diversity of species and families, estimated by means of the Shannon index, was significantly ($P \leq 0.05$) different among elevational levels; the highest diversity values were found at heights of 51 to 100 m and greater than 101 m. On the other hand, in the diversity estimated through the Simpson index, no significant ($P > 0.05$) differences were found among the three elevations.

árboles por parcela. De acuerdo con la Figura 1, el laurel (*Cordia alliodora* [Ruiz & Pav.] Oken), roble (*Tabebuia rosea* [Bertol.] DC.) y zapote (*Pouteria sapota* [Jacq.] H. E. Moore & Stearn.) fueron las especies más abundantes con 29, 26 y 23 árboles, respectivamente. De las especies registradas, 13 presentaron poca abundancia con tan solo un árbol; de estas, ocho se encontraron mayormente localizados en el menor nivel altitudinal (0 a 50 m). No obstante, las especies de mayor abundancia se registraron en las tres alturas.

En cuanto al IVI, las familias Boraginaceae, Fabaceae, Sapotaceae y Meliaceae se encontraron entre las cinco más importantes, la cuales estuvieron representadas por especies localizadas en al menos dos de las alturas estudiadas. La familia Boraginaceae fue representada por especies de alto valor de importancia en los tres niveles altitudinales, lo que sugiere que se trata de taxones exitosos con especies capaces de desarrollarse en distintos ambientes y alturas (Figura 2). En contraste, la familia Fabaceae no estuvo representada con alguna especie de mayor IVI, pero si tuvo especies con menor IVI, tales como el zope (*Schizolobium parahyba* [Vell.] S. F. Blake) y chalum (*Inga micheliana* Harms), en dos niveles altitudinales.

Table 3. Diversity indexes by species and families of the cocoa agroforestry system in the studied heights of Soconusco, Chiapas.

Cuadro 3. Índices de diversidad por especies y familias del sistema agroforestal cacao en las alturas estudiadas del Soconusco, Chiapas.

Height (m)/ Altura (m)	Statistics/ Estadígrafos	Species/Especies		Families/Familias	
		Shannon Index/ Índice de Shannon	Simpson Index/ Índice de Simpson	Shannon Index/ Índice de Shannon	Simpson Index/ Índice de Simpson
0-50	Average/Promedio	1.340 ab	0.670 a	1.330 a	0.660 a
	Standard deviation/Desviación típica	0.472	0.210	0.510	0.198
	Standard error/Error estándar	0.197	0.082	0.190	0.083
	Lower limit/Límite inferior	0.032	0.542	0.031	0.536
	Upper limit/Límite superior	0.647	0.801	1.631	0.797
51-100	Average/Promedio	0.650 b	0.690 a	0.410 b	0.630 a
	Standard deviation/Desviación típica	0.701	0.285	0.426	0.324
	Standard error/Error estándar	0.323	0.125	0.291	0.127
	Lower limit/Límite inferior	0.147	0.514	0.041	0.429
	Upper limit/Límite superior	1.153	0.909	0.875	0.830
≥ 101	Average/Promedio	1.790 a	0.800 a	1.660 a	0.680 a
	Standard deviation/Desviación típica	0.669	0.148	0.552	0.134
	Standard error/Error estándar	0.323	0.125	0.291	0.127
	Lower limit/Límite inferior	0.290	0.598	2.118	0.486
	Upper limit/Límite superior	2.296	0.993	2.156	0.887

Mean values of the Shannon index and Simpson index with the same letter do not present significant statistical differences at elevational level, according to the multiple range test or Fisher's least significant difference (LSD) test ($P > 0.05$).

Valores medios del índice de Shannon e índice de Simpson con la misma letra no presentan diferencias estadísticas significativas a nivel altitudinal, de acuerdo con la prueba de rangos múltiples (contraste múltiple de rangos) o diferencias significativas de Fisher (DMS) ($P > 0.05$).

Similarity

According to Table 4, the Jaccard and Sørensen qualitative indices indicate that the greatest similarity was found between tree compositions from 0 to 50 m and ≥ 101 m; of the total number of species recorded, 12 were common in the three elevational ranges. However, according to Morisita-Horn's quantitative method, the similarity between heights was greater in AFSs located at elevational levels greater than 51 m.

Stored carbon

The land used by the cocoa AFSs, in the three elevational ranges studied in Soconusco, stores high levels of carbon with species that accumulate between $3.11 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ and $205 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Based on the information in Table 5, species growing at low and high elevations stored 39.5 % and 36 % of the total, respectively, while at medium elevation (51-100 m) only 24.5 % is stored.

A diferencia del análisis realizado en las familias, no se registraron especies importantes desarrolladas al mismo tiempo en los tres niveles de altura, solo en dos de estos (Figura 2). No obstante, algunas especies se encontraron en las tres alturas, pero con menor o mayor importancia en una u otra; tal es el caso del laurel, primavera, zapote, cedro (*Cedrela odorata* L.) y aguacate (*Persea americana* Mill.).

Diversidad

El Cuadro 3 muestra que la diversidad de especies y familias, estimada por medio del índice de Shannon, fue diferente significativamente ($P \leq 0.05$) entre niveles altitudinales; los valores más altos de diversidad se encontraron en las alturas de 51 a 100 m y mayores de 101 m. Por otro lado, en la diversidad estimada a través del índice de Simpson no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las tres altitudes.

Table 4. Similarity indices of cocoa agroforestry system species by pairs of heights studied in Soconusco, Chiapas.
Cuadro 4. Índices de similitud de las especies del sistema agroforestal cacao por pares de alturas estudiadas en el Soconusco Chiapas.

Pairs of heights (m)/ Pares de alturas (m)	Qualitative methods/ Métodos cualitativos		Quantitative method/ Método cuantitativo
	Jaccard	Sørensen	Morisita-Horn
0-50 and 51-100	0.2307	0.3750	0.4074
0-50 and ≥ 101	0.3428	0.5100	0.4325
51-100 and ≥ 101	0.2272	0.3700	0.4965

Table 5. Estimation of the stored carbon in the biomass of the cocoa agroforestry system species at the studied heights in Soconusco, Chiapas.

Cuadro 5. Estimación del carbono almacenado en la biomasa de las especies del sistema agroforestal cacao en las alturas estudiadas del Soconusco, Chiapas.

Height (m)/ Altura (m)	Number of trees (DBH ≥ 10 cm)/ Cantidad de árboles (DAP ≥ 10 cm)	Stored carbon ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)/ Carbono almacenado ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Classification/ Clasificación
0-50	89	362.1	High/Alto
51-100	39	224.9	High/Alto
≥ 101	49	329.4	High/Alto

DBH: diameter at breast height

DAP: diámetro a la altura del pecho

Discussion

Tree composition

The greatest abundance per plot was found in the elevational range ≥ 101 m, mainly due to the number of species recorded in the municipalities of Tuxtla Chico and Acapetagua, with dominance of trumpet tree (*Cecropia obtusifolia* Bertol.), chapón (*Stemmadenia donnell-smithii* [Rose] Woodson) and laurel. The tree composition of the three elevational ranges presented typical species of the agroecosystems where cocoa is cultivated, the record of which was similar to that reported in this same region by Salgado et al. (2007) and Roa-Romero et al. (2009).

The family Fabaceae, as one of the most represented, grouped species of the cocoa AFSs, as in the case of chalum (*I. micheliana*) in the municipalities of Tuxtla Chico, Acacoyagua and Suchiate. This species is commonly found as a shade tree in perennial crops, due to the architecture of its umbrella-shaped crown that allows the homogeneous entrance of light in the plantations. As a service tree it provides nitrogen due to its fixing capacity, and fertility through the pruning residues that are used in the form of dead cover (Barrance et al., 2013).

When examining the regularity of species abundance values when placed in decreasing order, it was observed that the distribution pattern corresponded to the mathematical models explained by Magurran (1989), Margalef (1995) and Krebs (1999), whose curve allowed interpreting the abundance information. This pattern began with a progression similar to a geometric series where few species (13) are dominant and practically rare; that is, a constant proportionality between abundances and species was assumed, so that the series was observed as a straight line in a logarithmic scale. Subsequently, an adjustment to a series with normal logarithmic distribution was observed, where there was a small number of abundant species and a large proportion of species with low abundance, which determined that the curve that it describes has the shape of an inverted jota. This distribution expresses with greater clarity the relationship of trees by species and where species with intermediate abundance were recorded, with respect to the total, and which became more frequent. Finally, the distribution pattern curve showed the conditions of the broken stick model in which species are equally abundant and can be organized into abundance classes.

Six of the 10 species with the highest IVI, at one or more of the elevational levels studied in Soconusco, were found at the elevational level of 51 to 100 m; this is due to the abundance, frequency and dominance of their basal diameter. Mamey sapote was among

Similitud

Acorde con el Cuadro 4, los índices cualitativos de Jaccard y Sørensen indican que la mayor similitud se encontró entre las composiciones arbóreas de 0 a 50 m y ≥ 101 m; del total de especies registradas, 12 fueron comunes en los tres rangos altitudinales. No obstante, según el método cuantitativo de Morisita-Horn, la similitud entre las alturas fue mayor en los SAF ubicados en los niveles altitudinales mayores de 51 m.

Carbono almacenado

El uso de las tierras por los SAF de cacao, en los tres rangos altitudinales estudiados del Soconusco, almacenan niveles altos de carbono con especies que acumulan entre $3.11 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y $205 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Con base en la información del Cuadro 5, las especies desarrolladas en alturas bajas y altas almacenaron 39.5 % y 36 % del total, respectivamente, mientras que en la altura media (51-100 m) se almacena solo 24.5 %.

Discusión

Composición arbórea

La mayor abundancia por parcela se encontró en el rango altitudinal ≥ 101 m, debido principalmente a la cantidad de especies registradas en los municipios de Tuxtla Chico y Acapetagua, con dominancia del guarumo (*Cecropia obtusifolia* Bertol.), chapón (*Stemmadenia donnell-smithii* [Rose] Woodson) y laurel. La composición arbórea de los tres rangos altitudinales presentó especies típicas de los agroecosistemas donde se cultiva el cacao, cuyo registro fue similar al señalado en esta misma región por Salgado et al. (2007) y Roa-Romero et al. (2009).

La familia Fabaceae, como una de las más representadas, agrupó especies propias de los SAF con cacao, tal es el caso del chalum (*I. micheliana*) en los municipios de Tuxtla Chico, Acacoyagua y Suchiate. Esta especie se encuentra comúnmente como árbol de sombra en cultivos perennes, debido a la arquitectura de la copa en forma de sombrilla que permite la entrada homogénea de la iluminación en las plantaciones. Como árbol de servicio proporciona nitrógeno debido a su capacidad fijadora, y fertilidad a través de los residuos de las podas que son utilizados en forma de cobertura muerta (Barrance et al., 2013).

Al examinar la regularidad de los valores de abundancia de especies cuando se ordenaron de forma decreciente, se observó que el patrón de distribución correspondió con los modelos matemáticos explicados por Magurran (1989), Margalef (1995) y Krebs (1999), cuya curva permitió interpretar la información de abundancia. Este patrón comenzó con una progresión

the species with the highest importance level at the three elevational levels, coinciding with the records of Roa-Romero et al. (2009). This is due to the fact that this species is a fruit tree of great acceptance for its contributions to the economic income of the producer. Commonly, the tree is part of the tree structure of coffee and cocoa plantations, established or naturally regenerated with or without agroforestry design. The location of the mamey sapote is random, as recorded in the plots of Tapachula, Huehuetán and Acapetagua. On the other hand, the mango (*Mangifera indica* L.), with greater presence in the height from 0 to 50 m, was one of the species with a lower importance value among the 10 most important species; however, this fruit tree is also of great importance to the producers because of the income it provides in light of the main crop's low prices. Mango was found in cocoa plantations in four municipalities, a situation similar to that recorded by Ramírez et al. (2013) in a 30-year-old cocoa AFS in Tabasco.

Among the timber species that were commonly recorded, at different heights and with a high importance index, is the laurel. Its popularity lies in the value of its wood for local use; it can be combined with annual and perennial crops in an AFS, and it is also used as a medicinal plant (Barrance et al., 2003). The presence of laurel in cocoa AFSs provides an alternative source of income for the producer. Sánchez, Pérez-Flores, Obrador, Sol, and Ruiz-Rosado (2016) also identified this and a large number of other timber species that can potentially be sustainable in cocoa AFSs.

Diversity and similarity

It was assumed that there is low diversity of species and families in the Soconusco region, considering that, in general, Shannon index values range from 1.5 to 3.5 (Zak & Willig, 2004) and that values greater than 3 mean high diversity. The lowest values were calculated at levels between 51 and 100 m, being able to influence the Tapachula municipality plot, whose diversity was null, since it had only one species (mamey sapote) with eight trees. However, according to the calculated Simpson index and considering that the range of values goes from 0 (low diversity) to 1 (high diversity), the cocoa AFSs presented medium diversity with a tendency to high diversity, since the values are higher than 0.50; the highest indices were found at heights greater than 100 m, which is related to their greater richness of species. In this context, it can be deduced that diversity is influenced by a greater height range (>100 m), since the sampled area was the same as in the elevational range from 51 to 100 m, where there was less species diversity and richness. These results may be due to the fact that at heights greater than 100 m there are still many remains of the original forest, whose

similar a una serie geométrica donde pocas especies (13) son dominantes y prácticamente raras; es decir, se asumió una proporcionalidad constante entre las abundancias y las especies, de manera que la serie se observó como una línea recta en escala logarítmica. Posteriormente, se observó un ajuste a una serie con distribución normal logarítmica, donde existió un número pequeño de especies abundantes y una gran proporción de especies poco abundantes, lo que determinó que la curva que describe tenga forma de jota invertida. Esta distribución expresa, con mayor claridad, la relación de árboles por especie y dónde se registraron especies con abundancia intermedia, respecto al total, y que llegaron a ser más frecuentes. Finalmente, la curva del patrón de distribución mostró las condiciones del modelo palo quebrado (*broken stick model*) en el que las especies son igualmente abundantes y se pueden organizar en clases de abundancia.

Seis de las 10 especies con mayor IVI, en uno o más niveles de altitud del Soconusco, se encontraron en el nivel altitudinal de 51 a 100 m; esto se debe a la abundancia, frecuencia y dominancia del diámetro basal. De entre las especies con mayor nivel de importancia en los tres niveles altitudinales se encontró el zapote, coincidiendo con los registros de Roa-Romero et al. (2009). Lo anterior obedece a que el zapote es un frutal de gran aceptación por los aportes a los ingresos económicos del productor. Comúnmente, el árbol se encuentra formando parte de la estructura arbórea de las plantaciones de café y cacao, establecidas o regeneradas naturalmente ya sea con o sin diseño agroforestal. La localización del zapote es aleatoria, tal como se registró en las parcelas de Tapachula, Huehuetán y Acapetagua. Por otro lado, el mango (*Mangifera indica* L.), con mayor presencia en la altura de 0 a 50 m, fue una de las especies con menor valor de importancia dentro de las 10 especies más importantes; sin embargo, este frutal también es de importancia trascendental para los productores por los ingresos que aporta ante los precios bajos del cultivo principal. El mango se encontró en plantaciones de cacao en cuatro municipios, situación similar a la registrada por Ramírez et al. (2013) en SAF de cacao de 30 años en Tabasco.

Dentro de las especies maderables que se registraron comúnmente, a diferentes alturas y con alto índice de importancia, se encuentra el laurel. Su popularidad radica en el valor de la madera para uso local; puede ser combinada con cultivos anuales y perennes en SAF; y, además, se usa como planta medicinal (Barrance et al., 2003). La presencia del laurel en los SAF con cacao es una alternativa como fuente de ingresos para el productor. Sánchez, Pérez-Flores, Obrador, Sol, y Ruiz-Rosado (2016) también identificaron esta y una gran cantidad de especies maderables que potencialmente pueden ser sustentables en los SAF con cacao.

species diversity has been maintained over time despite the application of shade management techniques for the development of the crop. It also influenced the existence of plantations in municipalities that have greater equity (relationship between richness and relative abundance of each species) and diversity, such as Tuxtla Chico. In this municipality, exploratory tours showed that producers have maintained an adequate diversity of species as shade, with the aim of obtaining additional income, and that they are part of traditional management; these results are similar to those obtained by Roa-Romero et al. (2009). The Simpson index is a measure of the probability that two trees taken randomly belong to the same species and is strongly related to the most abundant species in the sample, which are less sensitive to species richness. Therefore, the closer the index is to unity, the greater the probability of dominance of a species (Polo, 2008).

In the Soconusco region, the low diversity in cocoa AFSs at heights between 51 and 100 m is due to a lower equity between abundance and richness, where an individual-species ratio of 5.7 was calculated; this is not the case at heights greater than 100 m, where a tree composition equivalent to 1.52 trees per species was recorded, followed by the composition recorded at the lowest height studied (0 to 50 m), which was 2.51. Therefore, there is more equity in the cocoa AFSs that are located at heights greater than 100 m, because the ratio between richness and relative abundance of each species is greater.

With respect to the importance of species diversity as shade, the results indicated high variability of illumination in cocoa plantations at all elevational levels, given primarily by the number and type of species per plot, the canopy size of each species and poor management of tree diversity. According to Silva et al. (2013), if this diversity is properly managed, important benefits for the crop can be achieved.

On the other hand, from the qualitative point of view, the similar diversity in tree composition between the lowest and highest height studied is due to the presence of a large number of shared species and to greater diversity. However, from the quantitative point of view, the results of greater similarity between the highest heights may be related to a smaller difference between the number of recorded trees, in addition to greater similarity of the edaphoclimatic conditions with rainfall between 1600 and 4000 mm·year⁻¹, an average monthly temperature between 22 and 24 °C and Andosol and Acrisol soil types.

The diversity and similarity results showed that the agroecosystems where cocoa AFSs are developed show signs of low levels of disturbance, despite anthropogenic intervention in these natural

Diversidad y similitud

Se asumió que existe baja diversidad de especies y familias en la región del Soconusco, tomando en cuenta que, por lo general, los valores del índice de Shannon oscilan entre 1.5 a 3.5 (Zak & Willig, 2004) y que los valores superiores a 3 significan alta diversidad. Los valores más bajos se calcularon a niveles entre 51 y 100 m, pudiendo influir la parcela del municipio Tapachula, cuya diversidad fue nula, ya que tuvo una sola especie (zapote) con ocho árboles. No obstante, según el índice calculado de Simpson y considerando que el rango de valores va de 0 (baja diversidad) a 1 (alta diversidad), los SAF con cacao presentaron diversidad media con tendencia a una alta diversidad, ya que los valores son superiores a 0.50; los índices más altos se encontraron en alturas mayores de 100 m, lo cual se relaciona con la mayor riqueza de especies. En este contexto, se puede deducir que la diversidad está influenciada por un mayor rango de altura (>100 m), ya que la superficie muestreada fue la misma que en el nivel altitudinal de 51 a 100 m, donde hubo menor diversidad y riqueza de especies. Estos resultados pueden deberse a que en las alturas mayores de 100 m aún quedan muchos restos de la selva original, cuya diversidad de especies se ha mantenido con el tiempo a pesar de la aplicación de técnicas de manejo de la sombra para el desarrollo del cultivo. También influyó la existencia de plantaciones en municipios que presentan mayor equidad (relación entre riqueza y abundancia relativa de cada especie) y diversidad, como Tuxtla Chico. En este municipio, los recorridos exploratorios constataron que los productores han mantenido una diversidad adecuada de especies como sombra, con el objetivo de obtener ingresos adicionales, y que forman parte del manejo tradicional; estos resultados son similares a los obtenidos por Roa-Romero et al. (2009). El índice de Simpson es una medida de probabilidad de que dos árboles tomados aleatoriamente pertenezcan a la misma especie, y está fuertemente relacionado con las especies más abundantes de la muestra, las que son menos sensibles a la riqueza de especies. Por tanto, cuanto más se acerque el índice a la unidad, existe mayor probabilidad de dominancia de una especie (Polo, 2008).

En la región del Soconusco, la baja diversidad en los SAF de cacao en alturas entre 51 y 100 m se debe a una menor equidad entre la abundancia y la riqueza, donde se calculó una relación individuo-especie de 5.7; no así en las alturas mayores de 100 m, donde se registró una composición arbórea equivalente a 1.52 árboles por especie, seguido de la composición registrada en la menor altura estudiada (0 a 50 m) que fue de 2.51. Por tanto, existe más equidad en los SAF de cacao que están ubicados en alturas mayores de 100 m, debido a que la relación entre riqueza y abundancia relativa de cada especie es mayor.

environments; the abundance, richness and diversity of species at the three height levels have directly influenced the benefits they bring to producers, regardless of the income earned from the main crop (cocoa). In this sense, producers in the Soconusco region have a diversity of species for timber, energy, medicinal and food uses that make possible the existence of cocoa plantations with economic, ecological and social potential. These similarity measures have already been reported in other cocoa agroforestry environments by Hervé and Vidal (2008) and Zapfack et al. (2002) in Cameroon, who indicate that the type of management is a factor that determines a lower percentage of similarity, a situation inherent to each cocoa region.

According to the results, the establishment of fruit and timber species, based on the interests of the producer for the economic benefits they provide, influenced the tree composition, diversity and similarity of cocoa agroecosystems by elevational levels. This was related to the region's traditional culture and the intentional selection of producers in search of greater services in conjunction with the main crop. On the other hand, it also influenced the composition of the natural forest since many species originating from the primary forest have developed with a certain dominance and acceptance on the part of the producers. Also, as a result of the climate and soil variation with respect to height, the diversity of the vegetation has changed. In ascending order, we observed medium-height tropical forest, high-height tropical forest, and oak, mountain cloud and pine forests, which are natural vegetation of the Sierra Madre.

Carbon storage

A direct relationship was determined between aerial biomass carbon storage and species abundance. The greatest amount of carbon stored and estimated in the biomass of the species was found at the lowest elevational level (0 to 50 m), due to the greater number of recorded trees per total area, including very abundant species such as pink poui, mamey sapote and Spanish cedar. At the same elevational level (0 to 50 m), dominant species with total DBH of 473 m²·ha⁻¹ were recorded, while at an elevation of 51 to 100 m the lowest abundance and species with lower DBH were recorded, which may have influenced the results. Cerda, Espin, and Cifuentes (2013) determined that carbon storage capacity correlates with the basal area of timber and fruit trees. This means that tree thickness and size is as important as tree abundance and species richness.

In the present research, carbon storage was greater than that determined by Segura and Andrade (2008) in a cocoa AFS in Talamanca, Costa Rica, where they recorded 122 ± 24 Mg C·ha⁻¹; the difference may be due to the tree composition of each territory. In this

Con respecto a la importancia de la diversidad de especies como sombra, los resultados indicaron alta variabilidad de la iluminación en las plantaciones de cacao en todos los niveles altitudinales, dado fundamentalmente por el número y tipo de especies por parcelas, la dimensión del dosel de cada especie y el manejo deficiente de la diversidad de los árboles. Según Silva et al. (2013), si esta diversidad es manejada adecuadamente se pueden lograr importantes beneficios para el cultivo.

Por otra parte, desde el punto de vista cualitativo, la similitud de la diversidad en la composición arbórea entre la menor y mayor altura estudiada, se debe a la presencia de gran número de especies compartidas y con mayor diversidad. No obstante, desde el punto de vista cuantitativo, los resultados de mayor similitud entre las alturas más altas pueden estar relacionados con una menor diferencia entre la cantidad de árboles registrados, además de mayor similitud de las condiciones edafoclimáticas con precipitaciones entre 1600 y 4000 mm·año⁻¹, temperatura media mensual entre 22 y 24 °C y tipos de suelos Andosol y Acrisol.

Los resultados de diversidad y similitud demostraron que los agroecosistemas donde se desarrollan los SAF de cacao presentan indicios de niveles bajos de perturbación, a pesar de la intervención antrópica en estos medios naturales; la abundancia, riqueza y diversidad de especies en los tres niveles de altura han influido directamente en los beneficios que aportan a los productores, independientemente de los ingresos originados por la explotación del cultivo principal (cacao). En tal sentido, los productores de la región del Soconusco cuentan con una diversidad de especies para usos madereros, energéticos, medicinales y de alimentos que hacen posible la existencia de plantaciones de cacao con potencialidades económicas, ecológicas y sociales. Estas medidas de similitud ya han sido reportadas en otros ambientes agroforestales de cacao por Hervé y Vidal (2008) y Zapfack et al. (2002) en Camerún, quienes indican que el tipo de gestión es un factor que determina un menor porcentaje de similitud, situación inherente a cada región cacaotera.

De acuerdo con los resultados, el establecimiento de especies frutales y maderables, según los intereses del productor por los beneficios económicos que aportan, influyeron en la composición arbórea, diversidad y similitud de los agroecosistemas cacaoteros por niveles altitudinales. Lo anterior estuvo relacionado con la cultura tradicional y la selección intencionada de los productores en busca de mayores servicios de conjunto con el cultivo principal. Por otro lado, también influyó la composición del bosque natural, ya que muchas especies originadas del bosque primario se han desarrollado con determinada dominancia y aceptación por parte de los productores. Asimismo,

context, Somarriba et al. (2008) stated that an average total carbon level between 80 and 120 Mg·ha⁻¹ would be the most appropriate in order not to harm cocoa production; quantities above this value are considered high levels. Ortiz, Riascos, and Somarriba (2008) determined that cocoa-laurel systems fixed between 43 and 62 Mg C·ha⁻¹ in 25 years and that in one year they fixed between 1.7 and 2.5 Mg C·ha⁻¹, which corresponds to low storage levels. These same authors refer to research carried out by CATIE (Tropical Agricultural Research and Teaching Center) in Talamanca in 2005, where they report carbon accumulation rates in cocoa plantations, over a 25-year period, of between 2.1 and 2.8 Mg C·ha⁻¹·year⁻¹, whose densities ranged between 100 and 150 trees·ha⁻¹. In the present research, the high volumes of carbon accumulated in the biomass of the trees correspond to densities between 127 and 163 trees·ha⁻¹.

The capacity of agroforestry ecosystems to store carbon in the form of aerial biomass varies according to the age of the trees, and the diameter and height of the shade components. Andrade and Ibrahim (2003) state that AFSs can fix and store between 12 and 228 Mg·ha⁻¹, including soil organic carbon, which represents between 20 and 46 % of the carbon sequestered in primary forests.

From the knowledge of tree composition and species diversity by elevational levels in the cocoa AFSs of Soconusco, producers and decision-makers will be able to evaluate shade management alternatives in plantations, with the aim of designing efficient systems in each edaphoclimatic and physiographic condition. These alternatives may consider species of importance to producers according to their traditions and socio-economic needs, based on the uses of the diverse forest potential in the region. Likewise, strategies with an ecological and agronomic approach can be adopted, with the aim of preserving the diversity of existing species and applying integrated management technology that benefits both cocoa cultivation and forest species, in order to improve the sustainability of these agroecosystems.

Conclusions

The cocoa agroforestry systems in Soconusco, Chiapas had medium to high tree composition and diversity, whose distribution by elevational levels responds to the interests of producers and to the composition of the natural forest in each edaphoclimatic condition. The amount of carbon stored in the aerial biomass in the cocoa agroecosystems was high, mainly due to the abundance, richness and dominance of the species selected by the producer.

End of English version

como consecuencia de la variación del clima y los suelos con respecto a la altura, la diversidad de la vegetación se ha modificado. En orden ascendente se observó selva mediana, selva alta, y bosques de encinos, niebla y pinos, que son vegetaciones naturales de la Sierra Madre.

Almacenamiento del carbono

Se determinó una relación directa entre el almacenamiento del carbono de la biomasa aérea y la abundancia de especies. La mayor cantidad de carbono almacenado y estimado en la biomasa de las especies se encontró a más baja altura (0 a 50 m), debido al mayor registro de árboles por superficie total, entre ellos especies muy abundantes como el roble, zapote y cedro. En este mismo nivel altitudinal (0 a 50 m) se registraron especies dominantes con DAP total de 473 m²·ha⁻¹, mientras que en la altitud 51 a 100 m se registró la menor abundancia y especies con menor DAP, lo que pudo haber influido en los resultados. Cerda, Espin, y Cifuentes (2013) determinaron que la capacidad de almacenamiento de carbono se correlaciona con el área basal de los árboles maderables y frutales. Lo anterior significa que el grosor y tamaño de los árboles es tan importante como la abundancia de árboles y riqueza de especies.

En la presente investigación, el almacenamiento de carbono fue mayor que el determinado por Segura y Andrade (2008) en un SAF con cacao en Talamanca, Costa Rica, donde registraron 122 ± 24 Mg C·ha⁻¹; la diferencia puede deberse a la composición arbórea de cada territorio. En este contexto, Somarriba et al. (2008) afirmaron que un nivel medio de carbono total entre 80 y 120 Mg·ha⁻¹ sería el más adecuado para no perjudicar la producción de cacao; cantidades por encima de este valor se consideran niveles altos. Ortiz, Riascos, y Somarriba (2008) determinaron que los sistemas compuestos por cacao-laurel lograron fijar entre 43 y 62 Mg C·ha⁻¹ en 25 años y que en un año fijaron entre 1.7 y 2.5 Mg C·ha⁻¹, lo cual corresponde a niveles bajos de almacenamiento. Estos mismos autores refieren investigaciones desarrolladas por el CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) en Talamanca en el 2005, donde reportan tasas de acumulación en plantaciones de cacao de 25 años entre 2.1 y 2.8 Mg C·ha⁻¹·año⁻¹, cuyas densidades oscilaron entre 100 y 150 árboles·ha⁻¹. En la presente investigación, los volúmenes altos de carbono acumulado en la biomasa de los árboles corresponden con densidades entre 127 a 163 árboles·ha⁻¹.

La capacidad de los ecosistemas agroforestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la edad de los árboles, y diámetro y altura de los componentes de sombra. Andrade e Ibrahim (2003) expresaron que los SAF pueden fijar y almacenar entre

References / Referencias

- Almeida, A., & Valle, R. (2007). Ecophysiology of the cocoa tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(4), 425–448. doi: 10.1590/S1677-04202007000400011
- Andrade, H., & Ibrahim, M. (2003). ¿Cómo monitorear carbono en sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*, 10, 109–116. Retrieved from <http://www.fao.org/tempref/docrep/nonfao/lead/x6378s/x6378s00.pdf>
- Barrance, A., Beer, J., Boshier, O. H., Chamberlain, J., Cordero, J., Detlefsen, G., ...Stewart, J. (2003). *Árboles de Centroamérica. Un manual para extensionistas*. Costa Rica: OFI/CATIE. Retrieved from <https://www.arbolesdecentroamerica.info>
- Batanero, C. & Díaz, M. C. (2008). *Análisis de datos con Statgraphics*. Granada: Universidad de Granada. Retrieved from <https://www.ugr.es/~batanero/pages/ARTICULOS/anadatos.pdf>
- Casanova, L. F., Caamal, M. J. A., Petit, A. J. C., Solorio, S. F. J., & Castillo, C. J. B. (2010). Acumulación de carbono en la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Guazuma ulmifolia* asociadas y en monocultivo. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 45–50. Retrieved from <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/31644/articulo4.pdf;jsessionid=6F015D28B656479526937EC3CF352132?sequence=1>
- Cerda, R., Espin, T., & Cifuentes, M. (2013). Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*, 49, 33–41 Retrieved from <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/01/345.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2009). Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña. Retrieved from <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3640-cambio-climatico-desarrollo-america-latina-caribe-reseña>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Soconusco (0710) estado de Chiapas. Retrieved from http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102911/DR_0710.pdf
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2015). Región del Soconusco. Retrieved November 22, 2018 from http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_032.html
- Curtis, J. T., & McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32(3), 476–496. doi: 10.2307/1931725
- Eguren, L. (2004). *El mercado de carbono en América Latina y el Caribe: balance y perspectivas*. Santiago, Chile: CEPAL. Retrieved from https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/56201/S043136_es.pdf
- García, E. (1973). *Modificaciones del sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana* (2.ª ed.). México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Retrieved from <http://www.igeograf.12> y 228 Mg·ha⁻¹, incluyendo el carbono orgánico del suelo, lo cual representa entre 20 y 46 % del carbono secuestrado en los bosques primarios.
- A partir del conocimiento de la composición arbórea y diversidad de especies por niveles altitudinales en los SAF con cacao del Soconusco, los productores y tomadores de decisiones podrán evaluar las alternativas de manejo de sombra en las plantaciones, para diseñar sistemas eficientes en cada condición edafoclimática y fisiográfica. En estas alternativas se podrán considerar especies de importancia para los productores según sus tradiciones y necesidades socioeconómicas, con base en los usos del potencial forestal diverso en la región. Asimismo, se podrán adoptar estrategias con enfoque ecológico y agronómico, con el objetivo de preservar la diversidad de especies existentes y aplicar una tecnología de manejo integral que beneficie tanto al cultivo del cacao como a las especies forestales, para mejorar la sostenibilidad de estos agroecosistemas.

Conclusiones

Los sistemas agroforestales de cacao en el Soconusco, Chiapas, presentaron composición y diversidad arbórea de media a alta, cuya distribución por niveles altitudinales responde a los intereses de los productores y a la composición del bosque natural en cada condición edafoclimática. La cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea en los agroecosistemas de cacao fue alta, debido fundamentalmente a la abundancia, riqueza y dominancia de las especies seleccionadas por el productor.

Fin de la versión en español

unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

- Gayoso, J., & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque*, 26(2), 33–38. doi: 10.4067/S0717-92002005000200005
- Hervé, B. D., & Vidal, S. (2008). Plant biodiversity and vegetation structure in traditional cocoa forest gardens in southern Cameroon under different management. *Biodiversity and Conservation*, 17(8), 1821–1835. doi: 10.1007/s10531-007-9276-1
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Synthesis report: Climate change 2007*. Switzerland: Author.
- Krebs, J. (1999). *Ecological methodology*. USA: Edic. Addison Wesley Longman.
- Magurran, A. E. (1989). *Diversidad ecológica y su medición*. Barcelona, España: Ed. Vedral. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=150880>
- Margalef, R. (1995). *Ecología*. Barcelona, España: Ed. Omega. Retrieved from <http://www.ediciones-omega.es/ecologia/47-ecologia-978-84-282-0405-7.html>

- Ortiz, A., Riascos, L., & Somarriba, E. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería de las Américas*, 46, 26–29. Retrieved from http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5764/Almacenamiento_y_tasas_de_fijacion_de_biomasa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pennington, T. D., & Sarukhán, K. (2005). *Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies*. México: UNAM.
- Polo, C. S. (2008). Índices más comunes en biología. Segunda parte, similaridad y riqueza beta y gamma. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 4(1), 135–142. doi: 10.18359/rfcb.2239
- Ramírez, A., García, E., Obrador, J. J., Ruiz, O., & Camacho, W. (2013). Diversidad florística en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 29(3), 215–230. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000300001
- Roa-Romero, H. A., Salgado-Mora, M. G., & Álvarez-Herrera, J. (2009). Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco, Chiapas – México. *Acta Biológica Colombiana*, 14(3), 97–110. doi: 10.15446/abc
- Salgado-Mora, M. G., Ibarra, G., Macías-Sámamo, J. E., & López-Báez, O. (2007). Diversidad arbórea en cacaotales del Soconusco, Chiapas, México. *Interciencia*, 3(11), 763–768. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/339/33901107.pdf>
- Sánchez, F., Pérez-Flores, J., Obrador, J. J., Sol, A., & Ruiz-Rosado, O. (2016). Árboles maderables en el sistema agroforestal de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14, 2711–2723. doi: 10.29312/remexca.v0i14.440
- Schoeneberger, M. (2009). Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry Systems*, 75, 27–37. doi: 10.1007/s10457-008-9123-8
- Shibu, J. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76, 1–10. doi: 10.1007/s10457-009-9229-7
- Segura, M., & Andrade, H. (2008). ¿Cómo estimar rápidamente el carbono almacenado en la biomasa aérea de los sistemas agroforestales indígenas de Talamanca, Costa Rica? *Revista Agroforestería de las Américas*, 46, 97–103. Retrieved from http://www.worldcocoaoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/segura2008b.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). Intención de cosecha por estados de México en ciclos perennes. Retrieved from http://infosiap.siap.gob.mx/opt/agricultura/intension/Intencion_cosechaPerenne_estado2018.pdf
- Silva, C., Orozco, L., Rayment, M., & Somarriba, E. (2013). Conocimiento local sobre los atributos deseables de los árboles y el manejo del dosel de sombra en los cacaotales de Waslala, Nicaragua. *Revista Agroforestería de las Américas*, 49, 51–60. Retrieved from http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7050/RAFA_49_Completa.pdf;sequence=3
- Somarriba, E., Andrade, H., Segura, M., & Villalobos, M. (2008). ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas de Costa Rica? *Revista Agroforestería de las Américas*, 46, 81–88. Retrieved from <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A3126e/A3126e.pdf>
- Somarriba, E., & Quesada, F. (2005). *El diseño y manejo de la sombra en el cacaotal*. Costa Rica: CATIE. Retrieved from <http://www.aprocacaho.com/wp-content/uploads/2013/07/SOMBRA-DEL-CACAO-CATIE.pdf>
- Stiling, P. D. (1999). *Ecology: Theories and applications*. USA: Ed. Prentice Hall.
- Useros, J. L. (2013). El cambio climático: Sus causas y efectos medioambientales. *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid*, 50, 71–98. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4817473.pdf>
- Zak, J. C., & Willig, M. R. (2004). Fungal biodiversity patterns. In G. M. Mueller, G. Bills, & M. S. Foster (Eds.), *Biodiversity of fungi: Inventory and monitoring methods* (pp. 59–75). Amsterdam: Elsevier, Academic Press.
- Zapfack, L., Engwald, S. S., Achoundong, G., & Madong, B. (2002). The impact of land conversion on plant biodiversity in the forest zone of Cameroon. *Biodiversity and Conservation*, 11(11), 2047–2061. doi: 10.1023/A:1020861925294