



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ciencias Biológicas



**“ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO EN EL SISTEMA
AGROFORESTAL CACAO EN TABASCO”**

Trabajo recepcional, en la modalidad de:

Tesis de Doctorado

Para obtener el grado en:

Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales

Presenta:

Pedro Salvador Morales

Directores:

Dra. Luisa del Carmen Cámara Cabrales

Dr. Rufo Sánchez Hernández

Dr. José Luis Martínez Sánchez

Villahermosa, Tabasco, México

Abril, 2019



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCION**

MARZO 26 DE 2019

**C. PEDRO SALVADOR MORALES
PAS. DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO EN EL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO EN TABASCO”**, asesorado por la Dra. Luisa del Carmen Cámara Cabrales, Dr. Rufo Sánchez Hernández y Dr. José Luis Martínez Sánchez, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Adalberto Galindo Alcántara, Dr. Eduardo Valdés Velarde, Dra. Luisa del Carmen Cámara Cabrales, Dr. Rufo Sánchez Hernández, Dr. José Luis Martínez Sánchez, Dra. Carolina Zequeira Larios y Dr. Humberto Hernández Trejo.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTORA

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

CARTA AUTORIZACIÓN

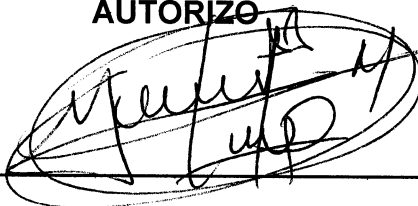
El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de doctorado denominado: **“ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO EN EL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO EN TABASCO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 26 Días del mes de marzo de 2019

AUTORIZO



PEDRO SALVADOR MORALES

DEDICATORIA

A mis padres Antonio Salvador Álvarez^t y María Morales Montero, por la vida, por el amor que siempre me han dado y por sus consejos que sin duda han sido el motor en mi formación como persona y conseguir cada una de mis metas en la vida; esta es una más.

A mis hermanos Jorge, Carmen^t, Andrea^t, José Isabel, Martina, Rosa^t, Vicencia, Reyna María y Luis Antonio. Con cariño agradezco sus consejos y quienes ya no están entre nosotros sus recuerdos vivirán en nuestros corazones.

Con especial cariño dedico este logro a mi esposa Manuela Carina Prott Tobilla, por acompañarme y apoyarme decididamente en mi formación Doctoral.

A mis hijos Pedro Antonio, José Manuel, Sofía y Diego, motores que me impulsan a ser cada día mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

A la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por abrirme sus puertas y permitirme realizar el Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca económica otorgada durante los cuatro años de formación Doctoral.

Al Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca por el espacio brindado en el laboratorio, para procesar las muestras de suelo.

A la División Académica de Ciencias Agropecuarias (DACA) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por el espacio brindado en el laboratorio, para analizar las muestras de suelo.

A la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo otorgado para realizar mi estancia doctoral y análisis de C y N en muestras de suelo.

A mis directores de tesis Dra. Luisa del Carmen Cámara Cabrales y al Dr. Rufo Sánchez Hernández, por su asesoría en el desarrollo del proyecto de investigación, redacción de los artículos y desarrollo de la tesis.

Al comité tutorial por sus atinados consejos durante el desarrollo del proyecto de investigación.

A todas aquellas personas que de manera directa e indirecta contribuyeron a este logro tan importante y que me hicieron falta mencionar.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT..... | 2 |
| ESTRUCTURA DE LA TESIS..... | 3 |
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 4 |
| 1.1 Planteamiento del problema..... | 5 |
| 1.2 Justificación..... | 6 |
| 1.3 Antecedentes..... | 7 |
| 1.3.1 Ciclo global del carbono..... | 7 |
| 1.3.2 Sumidero de carbono en la naturaleza..... | 8 |
| 1.3.3 El suelo como almacén de carbono..... | 9 |
| 1.3.4 Formas del carbono edáfico..... | 10 |
| 1.3.5 Los bosques como almacén de carbono..... | 10 |
| 1.3.6 Sistemas agroforestales y secuestro de carbono..... | 11 |
| 1.3.7 El sistema agroforestal cacao y la captura de carbono..... | 12 |
| 1.4 Hipótesis..... | 14 |
| 1.5. Objetivo general..... | 14 |
| 1.5.1. Objetivos específicos..... | 14 |
| 1.6 Metodología general..... | 15 |
| 1.6.1 Ubicación del estudio..... | 15 |
| 1.6.2 Selección de sitios de muestreo..... | 16 |
| 1.6.3 Caracterización del sistema agroforestal cacao..... | 17 |
| 1.6.4 Muestreo de la vegetación..... | 19 |
| 1.6.5 Muestreo de suelo..... | 19 |
| 1.6.6 Procesamiento de las muestras de suelo..... | 20 |
| 1.7 Bibliografía..... | 20 |
| CAPÍTULO 2: Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en el sistema agroforestal cacao..... | 26 |
| CAPÍTULO 3: El carbono de la estructura edáfica en el sistema agroforestal de cacao en Tabasco México..... | 48 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 4: Evolución del contenido de carbono orgánico del suelo en una cronosecuencia de reemplazo de cacaotal a pastizal en el Sureste Mexicano..... | 70 |
| CAPÍTULO 5..... | 86 |
| 5.1 Conclusión general..... | 86 |
| 5.2 Anexos..... | 87 |

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1: Introducción general

| | |
|---|----|
| Figura 1. Compartimentos y flujos globales de carbono (Pg)..... | 8 |
| Figura 2. Representación esquemática de las interrelaciones holísticas entre los principales factores que afectan el secuestro de carbono en el suelo en sistemas agroforestales..... | 12 |
| Figura 3. Distribución de las plantaciones de cacao en Tabasco, México..... | 16 |
| Figura 4. Parcela temporal de muestro de especies arbórea y muestreo de suelos en el sistema agroforestal de cacao en, Tabasco..... | 20 |

Capítulo 2: Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao.

| | |
|--|----|
| Figura 1. Número de árboles sombra distribuidos por clase de altura según la edad de los SAFC..... | 35 |
| Figura 2. Número de árboles sombra distribuidos por clase diamétrica según la edad de los SAFC..... | 35 |
| Figura 3. Número de árboles sombra distribuidos por clases de altura en el SAFC según grupos de suelos..... | 36 |
| Figura 4. Número de árboles sombra distribuidos por clases diamétricas en el SAFC según grupos de suelos..... | 37 |
| Figura 5. Carbono de la biomasa aérea por clase de edad del SAFC. Letras diferentes entre edades representan diferencia significativa ($P < 0.05$)..... | 38 |
| Figura 6. Carbono almacenado en la biomasa de los árboles en el SAFC por grupo de suelo. Letras diferentes entre edades representan diferencia significativa ($P < 0.05$)..... | 38 |

Capítulo 3: El carbono de la estructura edáfica en el sistema agroforestal de cacao en Tabasco México.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Análisis de regresión lineal entre la EAS con respecto al DMP de los agregados de los suelos..... | 56 |
|---|----|

Capítulo 4: Evolución del contenido de carbono orgánico del suelo en una cronosecuencia de reemplazo de cacaotal a pastizal en el sureste mexicano.

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localización de los sitios de muestreos en comunidades de Jalpa de Méndez (Tabasco, México)..... | 73 |
|--|----|

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 3: El carbono de la estructura edáfica en el sistema agroforestal de cacao en Tabasco México.

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Descripción de suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco, México..... | 53 |
| Tabla 2. Descripción de suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco, México..... | 54 |
| Tabla 3. Variables descriptivas de la estructura de suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco, México..... | 55 |
| Tabla 4. Porcentaje de C, N y relación C/N por tamaño de agregados según la profundidad en suelos del sistema agroforestal cacao en Tabasco México. | 57 |

Capítulo 4: Evolución del contenido de carbono orgánico del suelo en una cronosecuencia de reemplazo de cacaotal a pastizal en el sureste mexicano.

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Valores de la densidad aparente (ρ_b) y la compactación edáficas (0-30 cm) con diferentes usos del suelo (pastizal PZ y cacaotal SAFC) en el Sudeste mexicano..... | 77 |
| Tabla 2. Contenidos de COS y algunas propiedades químicas edáficas (0-30 cm) de una cronosecuencia de cambio de Pastizal:SAFC en el Sudeste mexicano..... | 78 |
| Tabla 3. Distribución vertical del COS en una cronosecuencia de pastizales y SAFC en el Sudeste mexicano (por capas edáficas)..... | 78 |

RESUMEN

La conservación de los sistemas agroforestales de cacao (SAFC) en Tabasco México, requiere la revaloración de sus funciones ambientales, debido a que representan relictos de vegetación arbórea en un paisaje dominado por áreas cultivadas. Por lo anterior, se desarrolló una investigación cuyos objetivos fueron evaluar el componente arbóreo en términos de la diversidad, estructura arbórea y carbono almacenado. En el componente edáfico, determinar el tamaño y estabilidad de los agregados, así como el contenido de carbono, nitrógeno y relación C/N por cada tamaño de agregado, para determinar los mecanismos de protección de carbono en la estructura edáfica. Así como evaluar el impacto del cambio de uso de suelo de SAFC a pastizal (PZ) sobre los niveles de COS y otras propiedades indicadoras de la fertilidad edáfica. Para ello, se establecieron parcelas temporales de muestreo de 1000 m² establecidas en suelos Gleysols (GL), Fluvisols (FL), Vertisols (VR) y Cambisols (CS). En dichas parcelas se inventariaron las especies arbóreas presentes para determinar la biomasa aérea a través de ecuaciones alométricas y se estimaron los contenidos de carbono en dicho componente. En el componente edáfico se muestreó a 0-10, 10-20, 20-30 cm de profundidad, para cuantificar el COS por grupo de suelo y por tamaño de agregado. Además, se evaluó el impacto del cambio de uso de suelo en sitios que registraron un cambio de SAFC a pastizal (PZ) entre 1-5, 6-10 y 11-20 años, como referencias se consideró un SAFC de entre 20-35 años. Se concluye que los SAFC en Tabasco son similares en diversidad y estructura arbórea; los SAFC más viejos se establecen en Fluvisols, son ligeramente más diversos y registran mayor área basal, por lo que almacenan más C en la biomasa aérea, por lo que se puede afirmar que el carbono almacenado en la biomasa aérea del SAFC, depende de la diversidad existente, edad del cultivo, manejo, especies presente, además del área basal, más que el número de especies. En el componente edáfico, el almacenamiento de C depende del tipo de suelo, calidad y cantidad de materia orgánica, así como la estabilidad de los agregados del suelo. El cambio de uso de suelo de SAFC a PZ no ocasionó una disminución significativa de la cantidad de COS almacenado (0-30 cm) durante el tiempo considerado respecto al SAFC. Sin embargo, si sólo se muestrean los -10 cm primeros del suelo, se observa una disminución de la fertilidad física y química a largo plazo.

ABSTRAC

The conservation of the agroforestry cocoa systems (SAFC) in Tabasco, requires a new appreciation of its environmental functions, as they represent reducts of tree vegetation in a landscape dominated by crop areas. For that reason, a research was developed in which the objectives were the evaluation of the tree component in terms of the diversity, structure and stored carbon. In the edafic component, to measure the size and stability of the aggregates, as well as the carbon and nitrogen content and its C/N relation for each aggregate size, to determine the carbon protection mechanism in the edafic structure. The COS levels and other edafic fertility indicators when changing the land use from SAFC to pastureland (PZ) were also evaluated. In order to do so, 1000 m² temporal plots were established in Gleysols (GL), Fluvisols (FL), Vertisols (VR) and Cambisols (CS) soils. In those plots the tree species were inventoried to measure the biomass through allometric equations and from there the carbon contents were estimated. Samples were taken at 0 – 10, 10 – 20, and 20 – 30 cms of depth to quantify the COS in each soil group and in each aggregate size. Besides, the impact of the land use change was evaluated in sites that went from SAFC to PZ in between 1 -5, 6 – 10 and 11 – 20 years, a 20 – 35 years old SAFC was considered as reference. It was concluded that the SAFC in Tabasco are similar in diversity and tree structure; the older SAFC are established in Fluvisols, they are slightly diverse and they have a bigger basal area so they store more C in their air biomass, therefore it can be stated that stored carbon in the air biomass of the SAFC, depends on the existing diversity, crop age, management, established species as well as the basal area being more determinant than the species number. In the edafic component, the C storage depends on the soil type, the quality and quantity of the organic material, and in the stability of the soil aggregates. The change of land use didn't cause a significant drop in the quantity of stored COS (0 – 30 cms) during the considered time frame compared with the SAFC. However, if only the first – 10 centimeters of soil are sampled, a decrease in the physical and chemical fertility is observed in the long term.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está estructurada por cinco capítulos. En el capítulo 1, se expone un panorama general de la investigación sobre a) Causas del incremento de gases de efecto invernadero en la atmosfera, b) importancia del cultivo de cacao en Tabasco, c) Ciclo global del carbono, c) Principales sumideros de carbono y su almacenamiento, d) Hipótesis, e) objetivos, y f) Metodología.

En el capítulo 2, se evaluó la diversidad, estructura arbórea y carbono almacenado en el sistema agroforestal cacao (SAFC). Los SAFC se inventariaron para determinar la diversidad a través de los índices de Shannon-Wiener y Sorenson, la estructura arbórea se evaluó mediante el índice de valor de importancia, clases diamétricas y alturas. La biomasa aérea se estimó a través de ecuaciones alométricas, con lo que se calcularon los contenidos de carbono.

Capítulo 3. Se caracterizaron físicamente los suelos Cambisols, Fluvisols, Gleysols y Vertisols, cultivados con sistemas agroforestales de cacao (SAFC), se fraccionó la estructura de dichos suelos para determinar el tamaño y estabilidad de los agregados, así como cuantificar el contenido de carbono, nitrógeno y relación C/N según tamaño de agregado, para determinar los mecanismos de protección de carbono en la estructura

Capítulo 4. Fue evaluado el impacto del cambio de uso de suelo del Sistema Agroforestal de Cacao (SAFC) sobre los niveles de Carbono Orgánico del Suelo (COS) y otras propiedades indicadoras de la fertilidad edáfica (densidad aparente ρ_b , capacidad de intercambio catiónico CIC, N total del suelo NTS), cuando se produce un cambio de uso de suelo de SAFC a pastizal (PZ). Para ello, se seleccionaron sitios donde se registró este cambio de uso del suelo, considerando diferentes intervalos de tiempo (1-5, 6-10 y 11-20 años). Como referencia se consideró un SAFC de 20-35 años.

Capítulo 5. Incluye la discusión general sobre a) captura de carbono en el sistema agroforestal cacao, b) almacenamiento de carbono en el SAFC, c) impacto en el almacenamiento de carbono orgánico por el cambio de uso de suelo y d) conclusión general del proyecto de investigación

CAPITULO I

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2) y ozono (O^2), han contribuido significativamente al incremento de la temperatura. Las emisiones anuales de estos gases a la atmosfera crecieron alrededor del 80% entre 1970 y 2004, pues pasaron de 21 a 38 Gt (IPCC 2007, Cerda *et al.* 2013). El dióxido de carbono (CO_2) es considerado como uno de los gases de efecto invernadero que mayor incide en el calentamiento global puesto que su contribución se ha calculado entre el 50 y 75% del total de dichos gases (Díaz-Franco *et al.*, 2007). En los últimos 200 años, los incrementos del CO_2 en la atmosfera han sido de 280 a 375 ppm y continúa aumentando a una tasa promedio superior a 1.5 ppm por año (Concha *et al.* 2007).

En contra parte a esto, los bosques juegan un papel fundamental en el ciclo global del carbono (Ordoñez y Masera, 2001) sirviendo como sumideros del mismo pues aproximadamente del 42 al 50% de la biomasa seca de un árbol es carbono (Martínez y Leyva 2014). Los bosques contribuyen a mitigar el cambio climático global al almacenar carbono en la vegetación y en el suelo, e intercambiar carbono con la atmosfera a través de los procesos fotosintéticos y de respiración. El proceso de fotosíntesis fija de manera natural el carbono, y a su vez mitiga el problema de cambio climático (Karjalainen, 1996). Aunado a esto los sistemas agroforestales disminuyen la presión de los bosques naturales, ayudan a regular el clima; mejorar la calidad de agua, el paisaje y la biodiversidad, ayudan a prevenir desastres naturales, funcionan como refugio de especies animales y generan socialmente empleos y producen bienes y servicios (Ramírez *et al.* 2013; Sánchez *et al.* 2013; Nair *et al.* 2009; Beer *et al.* 2003; Guiracocha *et al.* 2001). En un sistema agroforestal, tanto el suelo como los árboles representan almacenes de carbono. Las plantas utilizan CO_2 y liberan O durante el proceso de la fotosíntesis, y almacenan componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados (Schlesinger y Andrews, 2000).

A este respecto el sistema agroforestal cacao, se caracteriza por mantener un dosel arbóreo y un suelo sin perturbar; esas características hacen de este sistema un importante sumidero de carbono. Por lo que en el presente estudio se plantea cuantificar los almacenes de carbono en los compartimentos vegetación aérea y suelos del sistema agroforestal cacao en el Estado de Tabasco, con la finalidad de revalorar este agrosistemas considerando sus funciones ambientales.

1.1 Planteamiento del problema

El cambio climático inducido por las actividades humanas es un problema mundial que afecta de forma negativa los procesos ecológicos, económicos y sociales que rigen el planeta (Somarriba *et al.* 2008). Este aumento en la temperatura se atribuye generalmente a una alta concentración en la atmósfera de los llamados “gases de efecto invernadero” (GEI). Se estima que el incremento de bióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃) en la atmósfera producirá un aumento en la temperatura media global entre 3 y 5 °C, y afectarán fuertemente los patrones de precipitación (IPCC, 2007).

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropogénico más importante. Entre 1970 y 2004, sus emisiones anuales han aumentado en aproximadamente un 80%, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt), y en 2004 representaba un 77% de las emisiones totales de GEI (IPCC 2007, Cerda *et al.* 2013). Durante el decenio 1995-2004, la tasa de crecimiento de las emisiones de CO₂ fue mucho mayor (0,92 Gt CO₂ anuales) que durante el período anterior de 1970-1994 (0,43 Gt CO₂ anuales) (IPCC, 2007). El aumento mundial de las concentraciones de CO₂ se debe principalmente al uso de combustibles de origen fósil, y los cambios de uso del suelo (Andrade *et al.*, 2013).

Los bosques, las selvas, los sistemas forestales y agroforestales juegan un papel importante en el secuestro de carbono, tanto en la biomasa arbórea, así como el componente suelo. En este sentido, resaltamos la importancia de los sistemas agroforestales (SAF) ya que estos pueden fijar y almacenar entre 12 y 228 t C ha⁻¹, incluyendo carbono orgánico del suelo, lo cual representa entre el 20 y 46% del carbono secuestrado en bosques primarios (Beer *et al.* 2003).

Actualmente en Tabasco el sistema producto cacao se ha visto seriamente afectado por la enfermedad causada por el hongo *Moniliophthora roreri*, (Torres de la Cruz *et al.*, 2011), la cual ha ocasionado pérdidas de entre 50-90% en plantaciones de bajo nivel tecnológico, a este problema se suman los altibajos en los precios de la producción. Si bien es cierto que el cacaotal es un sistema de gran arraigo en la agricultura del estado de Tabasco, las presiones que este sistema ha sufrido por los problemas mencionados anteriormente han provocado que muchos productores tomen la decisión de abandonar sus plantaciones y se hayan reducido los niveles de inversión en el sistema productivo, lo que acrecienta aún más el problema fitosanitario, o peor aún, se han talado las plantaciones de cacao para cambiar el uso de suelo por otros de mayor rentabilidad. Sin embargo, el impacto que causa este cambio de uso de suelo ocasiona un fuerte impacto ambiental, ya que el cacaotal es un sistema agroforestal que ofrece amplios beneficios al ambiente, como la producción de oxígeno, protección de la biodiversidad, control de erosión, y almacenamiento de carbono; particularmente en este último punto, el cacaotal se distingue por mantener una biomasa arbórea permanente durante varias décadas, el suelo se mantiene sin perturbar recibiendo cantidades importantes de hojarasca.

1.2 Justificación

El cambio climático es un problema compartido, por lo que en 1997 se firmó en Japón el Protocolo de Kyoto donde se establecieron compromisos vinculantes de reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) por parte de los países industrializados; entre otras acciones impulsan e incentivan al cuidado de los bosques, y selvas con fines de captura de carbono (C) Somarriba *et al.* (2008). En este sentido, en el estado de Tabasco uno de los SAF más difundidos es el Sistema Agroforestal de Cacao (SAFC), el cual se intercala el cultivo del árbol de cacao (*Theobroma cacao* L.) junto con árboles de sombra, así como cultivos anuales y perennes. Una de las funciones atribuida a los SAFC, es la mitigación del cambio climático global (CCG), a través de la captura de C en la vegetación y el suelo (Beer *et al.* 2003). La capacidad del SAFC para almacenar C aérea, depende del manejo, la edad de los árboles, diversidad arbórea, estructura vertical y horizontal (Somarriba *et al.* (2013) Schulze *et al.*, 2000;), para tener una idea sobre

la capacidad de almacenamiento de C de la biomasa en el SAFC, se usan ecuaciones alométricas para calcular volúmenes de biomasa tanto de los árboles de cacao, de sombra y otras especies acompañantes y el 50% de esta biomasa es carbono, por otro lado el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) depende de las condiciones físicas, químicas y biológicas que prevalecen en el suelo.

Por lo anterior en el presente trabajo de investigación se plantea evaluar cuantitativamente la capacidad de almacenamiento de C del sistema agroforestal cacao en el estado de Tabasco, revalorando las funciones ambientales del SAFC, contribuyendo a lograr el interés de los productores por conservar sus cacaotales

1.3 Antecedentes

1.3.1 Ciclo global del carbono

El ciclo del carbono es un ciclo biogeoquímico de gran importancia en la regulación del clima de la Tierra, ya que controla la transferencia de carbono entre el océano y el suelo (atmósfera y litósfera). El C, en su unión molecular con el oxígeno, constituye el bióxido de carbono (CO_2), gas cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (Arellano *et al.*, 2013).

De acuerdo con la (SERMANAT, 2009) el ciclo del carbono se puede dividir en dos fases, la primera corresponde a la fase biológica, en la cual, el carbono se encuentra de manera natural en la atmósfera en forma de bióxido de carbono o metano, como resultado de la descomposición de la materia orgánica, por los incendios forestales, por la expulsión de los volcanes o por la emisión de los organismos vivos. En esta primera fase las plantas absorben el CO_2 de la atmósfera y, mediante la fotosíntesis, lo utilizan para la construcción de todas sus estructuras (tallos, hojas, raíces, flores, frutos y semillas) Ordóñez y Masera (2001). Continuando con el orden de ideas, el C puede permanecer durante mucho tiempo en las plantas como en los ecosistemas, ya sea en la madera que sostiene a los árboles o en la hojarasca que cubre y nutre el suelo (Nair *et al.*, 2009). No obstante, también puede pasar como alimento a los herbívoros. El carbono regresa a la

atmósfera por la respiración y digestión de los animales o por la descomposición de sus desechos y de los restos vegetales y la hojarasca (Gallardo 2017).

La segunda fase es la llamada geológica y es mucho más lenta (SERMANAT, 2009). El bióxido de carbono que está libre en la atmósfera puede disolverse en el océano. Ahí se transforma en bicarbonato y se puede combinar con el calcio para formar grandes acumulaciones de roca caliza. De esta forma, el carbono se integra a la corteza terrestre y constituye la mayor reserva de carbono en todo el ciclo (Pérez-Estaun, *et al.*, 2009). Después de mucho tiempo, la actividad de los volcanes o la disolución de las rocas calizas (por ejemplo, por el agua de lluvia) regresan el carbono a la atmósfera en forma de gas, es decir, como bióxido de carbono (Martín-Chivelet, 2010).

1.3.2 Sumideros de carbono en la naturaleza

De acuerdo con Gallardo y Merino (2007) el carbono del planeta se almacena en cinco grandes compartimentos: las reservas geológicas, los océanos, la atmósfera, los suelos, y la biomasa vegetal: los océanos son el principal reservorio de C, este concentra 38,000 Pentagramos (Pg) de C; la geológica almacena 4000 Pg de C; la vegetación terrestre captura aproximadamente 850 Pg de carbono de los cuales en materia viva están 550 Pg y en la necromasa 300 Pg; el suelo es considerado el segundo reservorio de carbono más importante en el planeta después de los océanos llegando a almacenar 1500 Pg en el primer metro de profundidad, en tanto que en la atmósfera se concentra 750 Pg (Figura 1).

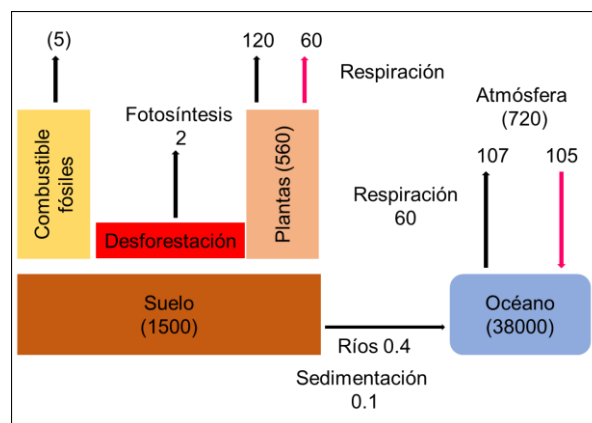


Figura 1. Compartimentos y flujos globales de C (Pg) Gallardo y Merino (2007).

1.3.3 El suelo como almacén de carbono

La capacidad de almacenamiento de C en los suelos ha sido ampliamente reconocida. Según Valdés-Velarde *et al.* (2012), los suelos que existen en el mundo contienen más C que la vegetación y atmósfera juntos; Batjes (1996) señala que el sistema terrestre (suelo-vegetación) es el *pool* potencialmente más lábil a corto plazo, a diferencia de los océanos. Hernández *et al.* (2011) mencionan que el suelo es considerado como la segunda reserva de C, y que es de suma importancia porque ayuda a mitigar los GEI en particular el C, además señalan que el principal mecanismo de almacenamiento ocurre mediante la protección física la materia orgánica (MO) en la estructura del suelo. Pardos (2010) menciona que, en el suelo, el C orgánico está contenido en la MOS.

Martínez *et al.* (2008) y Pardos (2010) refieren que el carbono orgánico del suelo (COS) es el principal elemento proveniente de la MOS, y constituye aproximadamente dos tercios del C secuestrado en los ecosistemas terrestres. Ćirić, *et al.* (2013) mencionan que el nivel de COS está ampliamente asociado con la estructura del suelo, ya que esta propiedad protege físicamente el C en los agregados. Por lo tanto, la estabilidad de los agregados es un factor importante en el funcionamiento del suelo y en la capacidad de almacenamiento del C.

Además del beneficio que el suelo ofrece al mantener almacenado el C orgánico, este COS asociado a la MOS proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico; mientras que su efecto en las propiedades físicas se manifiesta particularmente en la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso. Otro factor determinante en la capacidad de almacenamiento del COS además de las condiciones ambientales locales es el manejo del suelo (Martínez *et al.*, 2008).

Una manera de mantener el C en el suelo es reduciendo la perturbación de la estructura, por lo que el uso de la labranza de conservación permite aumentar la capacidad potencial de secuestro de C en el suelo, particularmente debido a una

reducción de la oxidación de la MO; esta reducción en la tasa de descomposición de la MO genera de manera indirecta que la temperatura del suelo disminuya (Martínez *et al.*, 2008). Otra alternativa para incrementar dicho potencial son las rotaciones e incorporaciones de residuos de cosecha de los cultivos, aumentar la cantidad de coberturas, y hacer un uso adecuado de los insumos (Follett, 2001). La MO puede ser protegida de descomposición acelerada mediante: 1) estabilización física por la microagregación, 2) estabilización fisico-química mediante asociación con partículas de arcilla, y 3) estabilización bioquímica mediante la formación de compuestos altamente recalcitrantes (Six *et al.*, 2002).

1.3.4 Formas del carbono edáfico

Carbono lábil: el C lábil es un estado de transición de la materia orgánica entre los residuos frescos y el humus del suelo (Lupi y Fernández, 2002). Esta fracción es sensible a las modificaciones a corto plazo, y se comporta como fuente de nutrientes para vegetales y organismos del suelo, siendo la más dinámica y sensible a través del tiempo (Zou *et al.*, 2004).

Carbono recalcitrante: es el reservorio de C que existe en el suelo que tienen distintos tiempos medios de residencia variando de uno o pocos años, dependiendo de la composición química- la lignina es más estable que la celulosa- a décadas o a más de 1000 años (fracción estable). También hay alguna conexión con la composición, pero principalmente con el tipo de protección o el tipo de uniones químicas. Para la fracción del carbono estable se debe hacer una distinción entre la protección física o química o captura: protección física significa un encapsulado de los fragmentos de la MO por las partículas de arcilla o por los macros o microagregados del suelo; protección química se refiere a uniones especiales de la MO con otros constituyentes del suelo (coloides o arcillas), pero más a menudo esto concierne a compuestos orgánicos del suelo muy estables (Martínez *et al.*, 2008; FAO, 2002).

1.3.5. Los bosques como almacén de carbono

El almacenamiento de carbono es uno de los servicios ambientales de los bosques y selvas. La fijación de carbono se genera en el proceso de fotosíntesis realizado por las hojas y otras partes verdes de las plantas, que capturan el CO₂ de la atmósfera y producen carbohidratos, liberan oxígeno y dejan carbono que se utiliza para formar la biomasa de la planta, incluyendo la madera en los árboles. Cuellar (1999) menciona que los bosques tropicales, las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales, pueden cumplir la función de "sumideros de carbono". En su revisión Ordoñez (1999) encontró que una parte del carbono fijado es transformado en biomasa y la otra parte es liberada a la atmósfera por medio de la respiración y que los bosques del mundo absorben 110 Gt C año⁻¹, mientras que mediante la respiración emiten 55 Gt C año⁻¹ y por medio de la descomposición emiten de 54 a 55 Gt C año⁻¹. En este sentido Pan *et al.*, (2011) menciona que el carbono (C) de los bosques del mundo se ha calculado en 861 Pg, de los cuales, 383 se encuentran en el suelo (44%) a 1 m de profundidad, 363 en la biomasa viva (por encima y por debajo del suelo 42%), 73 en la madera muerta (8%) y 43 se encuentran en el mantillo (5%).

1.3.6 Sistemas agroforestales y secuestro de carbono

De acuerdo con Nair *et al.*(2009) el secuestro de carbono en los sistemas agroforestales depende de un gran número de factores, que van desde las condiciones agroecológicas hasta las prácticas de manejo y que es importante mantener un enfoque con una visión holística de las interrelaciones entre los factores para comprender las complejidades del secuestro del suelo C, por lo que propone un esquema general que muestra la influencia de los principales factores, agrupándolos en cinco categorías, en el secuestro de C en el suelo (Fig. 2). Estos grupos de factores están tan interconectados entre sí, que el porcentaje de aportación de cada uno podría ser muy variable dependiendo del grado de influencia de cada grupo de factores entre sí. Similar a la ley de Liebig del mínimo, la salida final (SOC) será condicionada por el factor más limitante.

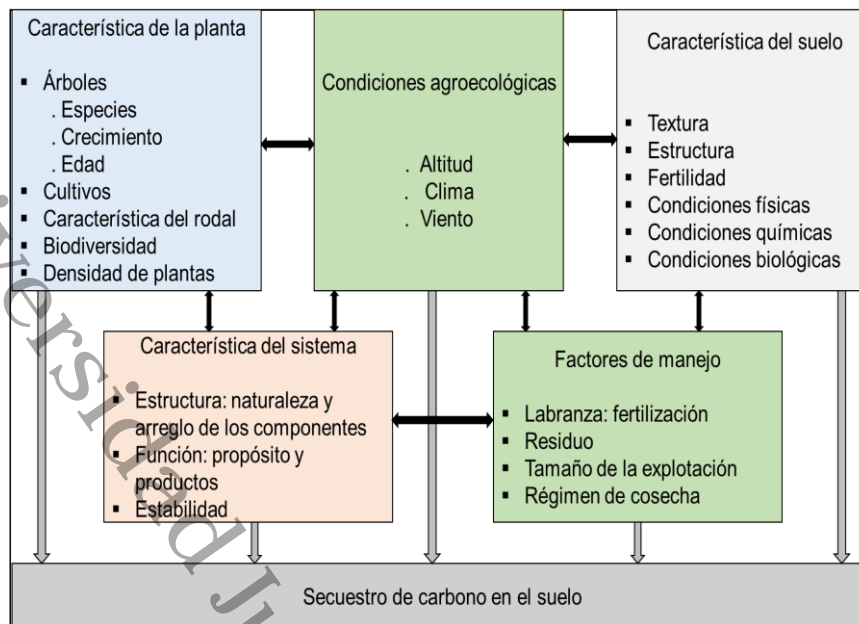


Figura 2. Representación holística esquemática de las interrelaciones entre los principales factores que afectan el secuestro de carbono en el suelo en sistemas agroforestales (Nair *et al.*, 2009)

1.3.7 El Sistema agroforestal cacao y la captura de carbono

Las plantaciones de cacao son SAF's donde además del cultivo de importancia económica se introducen árboles de sombra que pueden generar beneficios económicos y ambientales adicionales (Sánchez *et al.*, 2013). Andrade *et al.* (2013) mencionan que los sistemas agroforestales de cacao (SAFC) son considerados como mitigadores del cambio climático por capturar carbono en biomasa, necromasa y suelos. Somarriba y Harley (2003) se refirieron al cacaotal como un SAFC que incorpora especies maderables de importancia por su enfoque económico y ambiental; la primera por los ingresos económicos que genera, y la segunda por tener una contribución a la conservación de la biodiversidad, así como por la función como sumidero de C.

Captura de carbono en la vegetación del SAFC

La captura de carbono en el sistema agroforestal cacao ha sido reportado por diversos autores como Concha *et al.* (2007) quien en sus estudios determino el potencial de almacenamiento de C en el cacaotal y sus resultados indicaron que la

captura de C varía desde 26.2 Mg C ha⁻¹ hasta 45.07 Mg C ha⁻¹ en la biomasa de los árboles de cacao; el componente del sistema, que le sigue en capacidad de captura de C, es la biomasa arbórea de los árboles de sombra, la cual almacena entre 12.09 hasta 35.5 Mg ha⁻¹. La biomasa de hojarasca representa valores de 4.0 hasta 9.97 Mg ha⁻¹, mientras la biomasa de árboles muertos en pie y caídos muertos presentaron valores muy variables y bajos. Los sistemas agroforestales de 12 y 20 años pueden almacenar C en cantidades por encima de los 40 Mg C ha⁻¹, mientras que los sistemas de cinco años almacenan cantidades inferiores a los 30 Mg C ha⁻¹.

Somarriba *et al.* (2013) estimaron que la capacidad de captura de carbono en la biomasa aérea en el sistema cacao es de 49 Mg ha⁻¹ (cacao + árboles de sombra). Por otro lado, los resultados de Hernán *et al.*, (2013), en plantaciones de cacao fueron 28.8 y 33.6 tC ha⁻¹ en la biomasa aérea a los 18 y 35 años respectivamente.

Los estudios de Ortiz *et al.* (2008) se basaron en árboles de laurel y cacao con registro de 16 años, y extrapolados a 25 años, llegaron a alcanzar tasas entre 43 y 62 t C ha⁻¹, lo que equivale a 1.7 y 2.5 t C ha⁻¹ año⁻¹; estos autores indican que el laurel fija entre el 80-85% del C total en la biomasa, por lo que recomiendan que el secuestro de C puede ser implementado como un servicio ambiental.

Andrade *et al.* (2013) demostraron que la biomasa aérea de árboles de 18 años almacena en promedio 28.8 Mg C ha⁻¹ y 4.1 Mg C ha⁻¹ en hojarasca, y en biomasa de árboles de cacao de 35 años se almacenaron 33.6 Mg C ha⁻¹ y 4.5 Mg C ha⁻¹ en hojarasca.

Cerda *et al.* (2013) concluyen que la capacidad de almacenar C esta correlacionada con el área basal (AB) de los árboles, es decir, que el grosor y tamaño de los árboles es más importante que la abundancia de individuos y riqueza de especies, ya que los grupos de SAF's de cacao con mayor AB son capaces de almacenar más carbono total y biomasa aérea.

Almacenamiento de carbono en el suelo del SAFC

Los estudios de stock de carbono orgánico en suelos de cacaotales muestran que este puede almacenar 51 Mg C ha⁻¹ (Somarriba *et al.*, 2013).

Cerda *et al.*, (2013) determinaron el C almacenado en sistemas agroforestales de cacao donde el suelo almaceno 49.3 Mg C ha⁻¹.

Los estudios de Monroe *et al.* (2016) mostraron que el contenido de COS en siete sistemas de SAF cacao, bosque natural y pastizales a una profundidad de 100 cm, encontrando que en la capa superficial 20 cm se acumuló en promedio 31 y 44% del COS total almacenado disminuyendo conforme se incrementó la profundidad.

1.4 Hipótesis

- ❖ El sistema agroforestal cacao en el Estado de Tabasco, almacenan en la vegetación arbórea y suelo, cantidades de carbono muy semejantes a los reportados en otros lugares, además este depende de la edad, diversidad, practica de manejo así como la calidad y cantidad de materia orgánica presente en el sistema.
- ❖ El suelo del sistema agroforestal cacao en Tabasco, almacena cantidades de carbono superiores a los suelos de otros agrosistemas.

1.5. Objetivo general

- ❖ Estimar el contenido de carbono en los compartimentos suelo y vegetación arbórea del sistema agroforestal cacao en el estado de Tabasco.

1.5.1. Objetivos específicos

- ❖ Estimar el contenido de C en la biomasa aérea del sistema agroforestal cacao mediante ecuaciones alométricas.
- ❖ Estimar el contenido de carbono orgánico del suelo en el sistema agroforestal cacao.
- ❖ Estimar el contenido de carbono orgánico del suelo después de un cambio de uso de cacao a otro sistema de producción.

1.6 Metodología general

1.6.1 Ubicación de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en los municipios de Cárdenas, Jalpa de Méndez, y Comalcalco, que pertenecen a la Región de la Chontalpa, en el Estado de Tabasco. Sus coordenadas geográficas son 18°00'33.46" y 18°15'34.05"N, y 93°40'36.69" y 93°04'57.88"O. El clima es cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y una temperatura media anual de 26 °C y una precipitación anual de 2500 mm (INEGI, 2016).

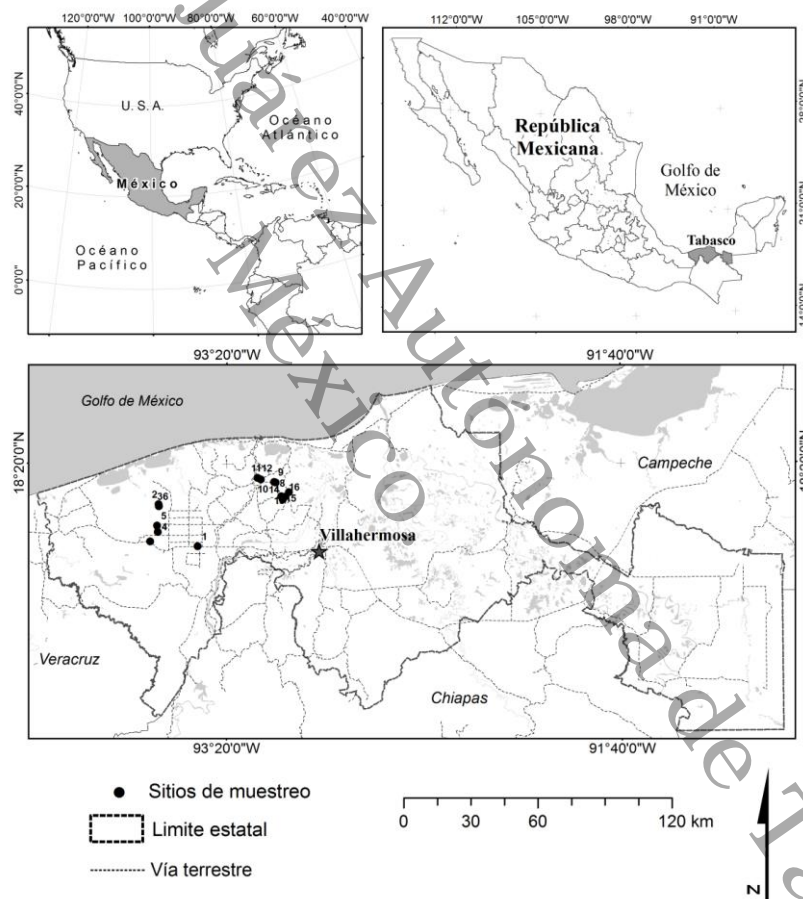


Figura 3. Distribución de los cacaotales muestreados en Tabasco, México.

1.6.2 Selección de sitios de muestreos.

Para seleccionar los sitios de muestreo, se realizaron recorridos de campo en la zona productora de los tres municipios. Se identificaron productores cooperantes, los cuales se entrevistaron para recabar información sobre la edad y manejo de las

plantaciones. Cada sitio fue georeferenciado para ubicarlos en un mapa de suelos que fue presentado por Jiménez *et al.* (2013). Según este mapa, los SAFC se establecen principalmente sobre suelos Cambisols (CM), Vertisols (VR), Fluvisols (FL) y Gleysols (GL).

1.6.3 Caracterización del sistema agroforestal cacao

El sistema agroforestal cacao establecido en suelos cambisols, estuvo conformado por cuatro parcelas con edades que oscilan entre 30 y 40 años, la especie cacao (*Theobroma cacao* L) registro una densidad de 570 árboles ha⁻¹, y los arboles sombra 250, de las cuales se encuentran especies como *Cedrela odorata* L., *Erythrina americana* Mill, *Colubrina arborescens* Mill., *Cecropia obtusifolia* Bertol., *Tabebuia rosea* Bertol., *Mangifera indica* L., *Cupania dentata*, *Cordia alliodora* Ruis y Pav.) Oken., *Samanea saman* (jacq.) Merr., *Tabernaemontana alba* Mill., *Heliocarpus donell-smithii*, *Gmelina arborea* Roxb, *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Gliricidia sepium* Jacq., *Annona muricata* L., *Guazuma ulmifolia* Lam. Las parcelas se encuentran ubicadas en el municipio de cárdenas en los poblados Vicente Guerrero (C-29), José María Morelos y Pavon (C-11) y José María Pino Suárez (C-22). Las especies de árboles sombra cuentan con un área basal promedio de 21.7 m² ha⁻¹ y árboles de cacao con 77.4 m² ha⁻¹.

El cacaotal establecido en suelos Vertisols, estuvo conformado por cuatro parcelas con edades que oscilan entre 20 y 35 años, la especie cacao (*Theobroma cacao* L) cuenta con una densidad de 445 árboles ha⁻¹, y los arboles sombra 327, de las cuales se encontraron *Erythrina americana* Mill., *Cedrela odorata* L., *Tabebuia rosea* Bertol., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Persea americana* Mill., *Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg. *Bixa Orellana*, *Heliocarpus terebinthinaceus* (DC.) Hochr., *Annona muricata* L., *Spondias mombim* L., *Cordia alliodora* (Ruis y Pav.) Oken., *Gliricidia sepium* (Jacq.), *Colubrina arborescens* Mill., *Cecropia obtusifolia* Bertol., *Cocos nucifera* L., *Lippia myriocephala* Schlechtendal y Cham., *Cupania dentata*, *Heliocarpus donell-smithii*, *Erythrina poeppigiana* (walp) O.F. Cook. Las parcelas se encuentran ubicadas en el municipio de cárdenas en los poblados José María Morelos y Pavon (C-11), General Pedro C. Colorado (C-26) y José María Pino

Suárez (C-22). Las especies de árboles sombra cuentan con un área basal promedio de 24.5 m² ha⁻¹ y árboles de cacao con 87.5 m² ha⁻¹.

El sistema agroforestal cacao establecido en suelos Fluvisols, de igual manera estuvo conformado por cuatro parcelas con edades que oscilan entre 13 y 50 años, la especie cacao (*Theobroma cacao* L) tuvo una densidad de 687 árboles ha⁻¹, y los arboles sombra 552, registrándose especies como *Cedrela odorata* L., *Cupania dentata*, *Diphysa robinoides* Benth, *Guazuma ulmifolia* Lam., *Tabebuia rosea* [Bertol] DC. *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg., *Cryosophyllum caimito*, *Artocarpus altilis*, *Cocos nucifera* L. *Salacia elliptica*, *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels, *Heliocarpus donell-smithii*, *Pouteria sapota* (Jacq.), *Mangifera indica* L., *Morus nigra* (L.) Sarg., *Erythrina americana* Mill., *Bursera simaruba*, *Citrus sinensis* (L.) Osb., *Sabal mexicana* Mart, *Pimenta dioica* L. Merr, *Inga jinicuil* G. Don, *Brosimum alicastrum* Swartz, *Gliricidia sepium* (Jacq.), *Citrus aurantium* L. Las parcelas se encuentra ubicadas en el municipio de Comalcalco en la Ranchería Paso de Cupilco, Ranchería Paso de Cupilco Sector Zapote, Villa Chichicapa y Buena vista Ranchería Norte primera sección. Este sistema cuenta con especies de árboles sombra con un área basal promedio de 24 m² ha⁻¹ y árboles de cacao con 97 m² ha⁻¹.

El sistema agroforestal cacao en estudio establecido en suelos Gleysols, estuvo conformado por cuatro parcelas con edades que oscilan entre 10 y 40 años, la especie cacao (*Theobroma cacao* L) registro una densidad de 697 árboles ha⁻¹, y los arboles sombra 252, registrándose especies como *Cedrela odorata* L., *Cupania dentata*, *Diphysa robinoides* Benth, *Tabebuia rosea* (Bertol) DC., *Persea americana* Mill, *Gliricidia sepium* Jacq., *Cocos nucifera* L., *Ceiba pentandra* (L.) Gaerth., *Citrus sinensis* (L.) Osb., *Sabal mexicana* Mart, *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg., *Psidium guajava* Nied., *Mangifera indica* L., *Artocarpus altilis*, *Persea schiedeana* Nees., *Salacia elliptica*, *Erythrina americana* Mill. Las parcelas se encuentran ubicada en el municipio de Jalpa de Méndez en los poblados Soyataco y la Ranchería Gregorio Méndez. Este sistema cuenta con especies arbórea con un área basal promedio de 28.9 m² ha⁻¹ y árboles de cacao con 110.1 m² ha⁻¹. •

De manera general estos cultivos cuentan con poco manejo, las prácticas de fertilización son casi nula, hay un control inadecuado de moniliasis por lo que se puede observar mazorcas infestadas en los árboles y las que se cortan aún permanecen dentro del cultivo, las podas de saneamiento son a destiempo, la mayoría de los cultivos son mayores de 40 años, los drenes se encuentran azolvados, son pocas las parcelas que han sembrado variedades mejoradas.

1.6.4 Muestreo de la vegetación

En cada grupo de suelo se establecieron cuatro parcelas temporales de muestreo de 1000 m² (20 x 50 m) (figura 4). En dichas parcelas se registraron las especies arbóreas, y a cada una de ellas se les midió los diámetros normales (DN), en los árboles sombra (1.3 m sobre el suelo) y en los árboles de cacao (0.3 m sobre el suelo) con cinta diamétrica, tal a como lo establece Matey *et al.* (2013). Se registraron las variables altura de los árboles con la regla de Christen. Asimismo, con la cooperación de productores, se registraron los nombres comunes de las especies arbóreas, y posteriormente se determinaron los nombres científicos (Ramírez *et al.*, 2013)

1.6.5 Muestreo de suelo

De las parcelas seleccionadas (1000 m²). Se dividieron en 10 subparcelas de donde se tomaron 10 puntos de muestreos (PM) (Figura 4); en cada PM se colectaron dos series de muestras de suelo. La primera serie se tomó a una profundidad de muestreo de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, con un cilindro de acero de volumen conocido, a las profundidades antes mencionadas, para la determinación de ρ_b , C y N. La segunda serie se tomó a 30 cm de profundidad en zig-zag para determinar textura.

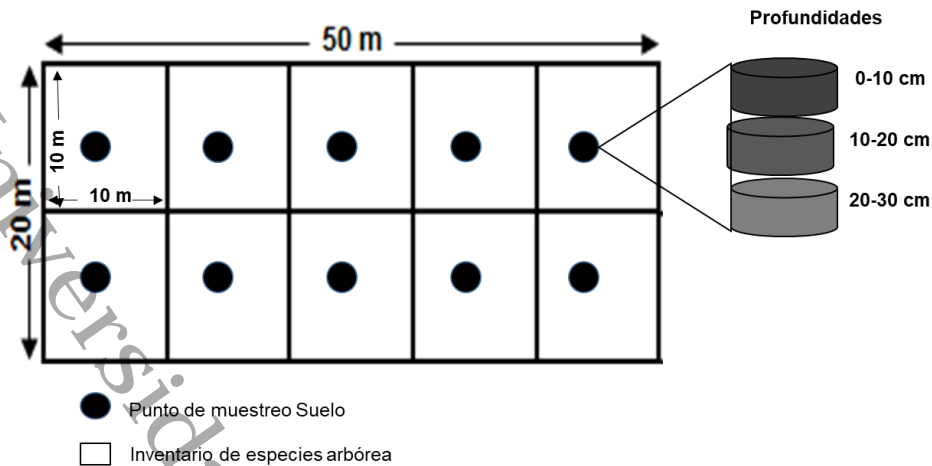


Figura 4. Parcela temporal de muestro de especies arbórea y de suelos en el sistema agroforestal de cacao en, Tabasco.

1.6.6 Procesamiento de las muestras de suelo

El procesamiento de las muestras de suelo se realizó en el Laboratorio de usos múltiples del Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca y en el laboratorio de Suelos de la División Académica de Ciencias Agropecuarias (DACA). Para la determinación de textura, las muestras se secaron a la sombra, molidas con un mazo de madera y tamizadas a un tamaño de partícula de 1 mm. Para la pb, las muestras se secaron en una estufa de aire forzado a 105° C, hasta obtener peso constante. El peso de suelo seco (PSS) de las muestras se relacionó con el volumen del cilindro, para determinar la ρ_b . Muestras de suelo secas fueron molidas y tamizadas para determinar el porcentaje del COS, esta actividad se realizó en el laboratorio de ecología de la Universidad Autónoma Chapingo Texcoco, México.

1.7 BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, H.J., Figueroa, J.M. del P. y Silva, D.P. 2013. Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroalimentaria*. 1:6-10.
- Arellano, E., Meza, F., Miranda, M. y Camaño, A. 2013. Cambio global: el cuidado de los humedales y su rol en el secuestro de carbono. *Agronomía y Forestal*. (47):22-27.

- Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 47:151-163.
- Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, JM; Somarriba, E; Jimenez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforesteria en las Americas* 10: 80-87.
- Cerda, B.R., Espín, C.T. y Cifuentes, M. 2013. Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforesteria en las Américas* No. 49
- Ćirić, V., Manojlović, M., Belić, M., Nešić, L. and Šeremešić, S. 2013. Effects of land use conversion on soil aggregate stability and organic carbon in different soils. *Agrociencia*. 47(6):539-552.
- Concha J. Y., J.C. Alegre, V. Pocomucha. 2007. Determinación de las reservas de Carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6 (1,2): 75-82
- Cuéllar, N. 1999. Los servicios ambientales del agro: el caso del café de sombra en El Salvador. *Prisma* 34: 1-16.
- Diaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E. y Etchevers-Barra, J. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. e Et Cham. *Madera y Bosques* 13(1), p. 25-34.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E. and Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*. 57:192-194.
- FAO. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, informe sobre los recursos mundiales de suelo 96. Roma 2002, pág. 61
- Follett, R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil and Tillage Research*. 61:77-92.
- Gallardo, J. F., Merino, A., & Fundación Gas Natural. (2007). El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemas forestales. El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Fundación Gas Natural, Barcelona, 43-64.
- Guiracocha, G., Harvey, C., Somarriba, E., Krauss, U., Carrillo, E., 2001. Conservación de la Biodiversidad en Sistemas Agroforestales con Cacao y Banano en Talamanca Costa Rica. *Agroforesteria en las Americas* 8 (30), 7–11.

- Hernán, J.A., Figueroa, J.M.P. y Silva, D.P. 2013. Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientiaagroalimentaria*. Vol. 1.p.6-10
- INEGI, 2016. Anuario estadístico y geográfico de Tabasco. 464 p.
- IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on climate change. (Summary for policymakers). <www.ipcc.ch>. Consulta: Abril 2015.
- Jiménez, R. R. 2013. Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. M.SC. Thesis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas Tabasco, México. 158 p.
- Karjalainen, T., 1996. Dynamics and potentials of carbon sequestration in managed stands and wood products in Finland under changing climatic conditions. *For. Ecol. Manage.* 80, 113–132.
- Lupi A.M. y Fernández, R. 2002. Plantación directa versus preparación intensiva ¿Cómo responde el suelo? El sitio agrícola.
- Martínez, E., Fuentes, J.P., Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal.* 8(1):68-96.
- Martínez, R.A y Leyva, G.A. 2014. La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales.* Vol. 35.No. 1. P. 11-20.
- Matey, A. Zeledón, L. Orozco, L. Chavarría, F. López, A. Deheuvels, O. 2013. Composición florística y estructura de cacaotales y parches de bosque en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 49:61–67.
- Martín-Chivelet, C.J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,* 18(1), 33-46.
- Nair, P. R., Nair, V. D., Kumar, B. M., & Haile, S. G. (2009). Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy,* 12(8), 1099-1111.
- Ordóñez, J. 1999. Captura de carbono en bosque templado: el caso de San Juan nuevo, Michoacán: primera edición 81p.
- Ordoñez, J.A.B. y Maser, O. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques.* 7(1):3-12.
- Ortiz, A., Riascos, L. y Somarriba, E. 2008. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas.* 46:26-29.

- Pan, Y, R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. Maguire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Pardos, J.A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid. 253 p.
- Pérez-Estaun, A., Gómez, M., y Carrera, J. (2009). El almacenamiento geológico de CO₂, una de las soluciones al efecto invernadero. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), 179-189.
- Ramírez, A., García L. E., Obrador O. J. J., Ruiz R. O., & Camacho C, W. (2013). Diversidad florística en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 29(3), 215-230.
- Sánchez H.R., J.D. Mendoza P., E. Salcedo P. 2013. Los sistemas Agroforestales: una alternativa para el manejo sustentable de bosques y agroecosistemas. *In*: Salcedo P. E., E. Hernández A., J.A. Vázquez G., T. Escoto G., N. Díaz E. (Eds.). *Los Recursos Forestales en el Occidente de México: Diversidad, Manejo, Producción, Aprovechamiento y Conservación*. Pp. 351-371. Ed. Amaya Ediciones S. de RL de CV.
- Sánchez-Hernández, R., Ramos-Reyes, R., Geissen, V., Mendoza-Palacios, J.D., De la Cruz-Lázaro, E., Salcedo-Pérez, E. y Palma-López, D.J. 2011. Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*. 29(2):211-219.
- Schlesinger W.H. & Andrews J.A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*. 48: 7-20.
- SEMARNAT. 2009. Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. DF.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 241:155-176.
- Somarriba E., R. Cerda, L. Orozco, M. Cifuentes, T. Espin, H. Mavisoy, G. Ávila, E. Alvarado, H. Dávila, V. Poveda, C. Astorga, E. Say, O. Deheuvels. 2013. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 173: 46-57.

- Somarriba, E. y Harvey, C.A. 2003. ¿Cómo integrar producción sostenible y conservación de biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas?. *Agroforestería en las Américas*. 10(37-38):12-17.
- Torres de la Cruz, M., Ortiz García, C. F., Téliz Ortiz, D., Mora Aguilera, A., y Nava Díaz, C. (2011). Temporal Progress and Integrated Management of Frosty Pod Rot (*Moniliophthora roreri*) of Cocoa in Tabasco, Mexico. *Journal of plant pathology*, 93(1), 31-36.
- Valdés-Velarde, E., Valdez-Hernández, J.I., Ordaz-Chaparro, V.M., Gallardo-Lancho, J.F., Pérez-Nieto, J. y Ayala-Sánchez, C. 2012. Carbono edáfico y calentamiento global: Importancia ecológica en los manglares de Nayarit, pp: 333-349. En: Salcedo-Pérez, E., Hernández-Álvarez, E., Vázquez-García, J.A., Escoto-García, T. y Díaz-Echavarría, N. (Eds.), *Recursos forestales en el Occidente de México: Diversidad, Manejo, Producción, Aprovechamiento y Conservación*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.
- Zou, X.M., Ruan, H.H., Fu, Y., Yang, X.D. y Sha, L.Q. 2005. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation–incubation procedure. *Soil Biology and Biochemistry*. 37(10):1923-1928.

Xalapa, Ver., a 7 de septiembre de 2018

Dr. Rufo Sánchez Hernández

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Presente

Estimado Dr. Rufo Sánchez Hernández:

En nombre del Comité Editorial de la Revista '*Madera y Bosques*' le informo que su artículo "**Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao**", cuyos autores son **Rufo Sánchez Hernández, Pedro Salvador Morales, Luisa del Carmen Cámara Cabrales, José Luis Martínez Sánchez y Eduardo Valdes Velarde**, y que fue registrado con la clave 1638 **ha sido aceptado para publicación**. Se adjuntan los documentos de evaluación para que proceda a realizar las correcciones menores que se indican.

Aprovecho la oportunidad para agradecerle a Ud. y a sus coautores el interés por publicar en '*Madera y Bosques*' y esperamos la sigan considerando como un medio de difusión de sus resultados de investigación.

ATENTAMENTE



Dr. Raymundo Dávalos Sotelo
Editor '*Madera y Bosques*'

Revista *Madera y Bosques*

Carretera antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa 91070, Veracruz, México
Correo electrónico: mabosque@inecol.mx Tel: (228) 8421800 ext. 6106

CAPITULO 2

DIVERSIDAD, ESTRUCTURA Y CARBONO DE LA VEGETACIÓN ARBOREA EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO

Diversity, structure and carbon of the arboreal vegetation on cocoa agroforestry systems

Pedro Salvador-Morales^{§1,2}, Luisa del C. Cámara-Cabrales¹, José L. Martínez-Sánchez¹, Rufo Sánchez-Hernández³, Eduardo Valdés-Velarde⁴.

¹División Académica de Ciencias Biológicas (DACBiol), UJAT. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya, Villahermosa, Tabasco, C.P. 86150. Correo-e: pchoco336@hotmail.com; teléfono +52 (993) 391 32 46

(§Autor para correspondencia).

²Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca (ITZO), Ignacio Zaragoza s/n, Villa Ocuilzapotlán, Centro, Tabasco, C.P. 86270.

³División Académica de Ciencias Agropecuarias, UJAT, Carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/A. La Huasteca, Segunda Sección Villahermosa, Tabasco 86280.

⁴ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco de Mora. C.P. 56230.

Resumen

La conservación de los sistemas agroforestales de cacao (SAFC) en Tabasco, México, requiere la revaloración de sus funciones ambientales, debido a que representan relictos de vegetación arbórea en un paisaje dominado por áreas cultivadas. Por tal motivo, se desarrolló una investigación para evaluar la diversidad, estructura arbórea y carbono almacenado en el SAFC, según edad, suelos. Para ello, los SAFC se inventariaron para determinar la diversidad a través de los índices de Shannon-Wiener y Sorenson, la estructura arbórea mediante el índice de valor de importancia, clases diamétricas y altura, así como la biomasa aérea estimada a través de ecuaciones alométricas, con lo que se calcularon los contenidos de Carbono. Se identificaron 24 familias, 37 géneros y 39 especies. Los SAFC ≥ 40 años poseen ligeramente más diversidad y densidad arbórea. Con base en la edad de los SAFC, la diversidad y estructura arbórea es mayor en los SAFC

≥40 con respecto a los SAFC>10-15 y SAFC>20-35 años; mientras que con respecto al grupo de suelo, los indicadores antes mencionados son más altos en los Gleysoles, seguido de los Fluvisoles, Cambisoles y Vertisoles. La edad y el tipo de suelo determinan el C almacenado en la biomasa aérea. El 75 y 25% del C de la biomasa aérea se almacena en árboles de sombra y cacao, respectivamente. Se concluye que los SAFC en Tabasco son similares en diversidad y estructura arbórea. Los más viejos, establecidos en suelos Fluvisols, son ligeramente más diversos y registran mayor área basal, por lo que almacenan más C en la biomasa aérea.

PALABRAS CLAVES: Índice de Shannon-Wiener, coeficiente de Sorenson, estructura vertical y horizontal, servicios ambientales, *Theobroma cacao*.

Abstract

The conservation of cocoa agroforestry systems (SAFC) in Tabasco, Mexico, requires the reevaluation of their environmental functions, due to represent relicts of arboreal vegetation in a landscape dominated by cultivated areas. For this reason, a research was developed to evaluate the diversity, arboreal structure and carbon stored in the SAFC, according age, soils and municipalities. For that, the SAFC were inventoried for to determinate the diversity across of the indexes Shannon-Wiener and Sorenson respectively, arboreal structure through of the importance value index, diametric classes and height, as well the aerial biomass estimated through of allometric equations, with which the contents of Carbon were calculated. We identified 24 families, 37 genera and 39 species. The SAFC>40 years have slightly more diversity and arboreal density. Based in the age of the SAFC, the arboreal diversity and structure is highest in the SAFC ≥40 with respect to SAFC>10-15 and SAFC>20-35 years; while as with respect to soil group, The aforementioned indicators are higher in the Gleysols, followed by the Fluvisols, Cambisols and Vertisols. The age and soil type determine the C stored in the aerial biomass. 75 and 25% of the C of aerial biomass is stored in shade trees and cocoa, respectively. It is concluded that the SAFCs in Tabasco are similar in diversity and tree structure. The older ones established in Fluvisols are slightly more diverse and register a larger basal area, so they store more C in the aerial biomass.

KEY WORDS: *Shannon-Wiener Index, Sorenson Coefficient, Vertical and horizontal structure, environmental services, Theobroma cacao.*

Introducción

Los sistemas agroforestales (SAF) combinan la actividad forestal con la agricultura o la ganadería, con la finalidad de producir alimentos, sin renunciar a los servicios ambientales que los árboles ofrecen (Sánchez *et al.*, 2013). Durante las últimas décadas, el sureste de México ha sufrido severos procesos de degradación, particularmente por cambio de uso de suelo y deforestación (Ramos *et al.*, 2004). Por ello resalta la importancia de los SAF, ya que estos representan relictos de vegetación arbórea, en paisajes dominados por tierras de cultivo, pastizales, zonas urbanas y humedales. Uno de los SAF más emblemáticos en los estados de Tabasco y Chiapas, es el Sistema Agroforestal de Cacao (SAFC), el cual intercala el cultivo del árbol de cacao (*Theobroma cacao* L.) con árboles de sombra, ya sean cultivos anuales o perennes. En Tabasco, el 96 % de los SAFC se distribuyen en la región de la Chontalpa, ocupan una superficie de 41,117 ha, que sustentan a 31,139 familias (Gutiérrez *et al.*, 2016). A pesar de la importancia que los SAFC tienen, este agrosistema ha sido presionado, particularmente debido a la caída de la producción, lo que ha propiciado un cambio de uso de suelo. Sin embargo, la pérdida de cobertura arbórea debido a la tala de los SAFC tiene implicaciones sociales, económicas y ambientales (Valenzuela-Córdova *et al.*, 2015). Una función importante de los SAFC es la conservación de la biodiversidad, definida esta como la variedad y abundancia de especies en un área de estudio determinada, la cual puede medirse tanto por la riqueza de especies, así como por la homogeneidad en su distribución, para lo cual se han desarrollado diversos índices (Magurran, 2004). Otra manera de evaluar el valor ecológico de un sistema forestal, es a través del conocimiento sobre la estructura y función de los árboles, lo que permite crear estrategias de producción para un desarrollo sostenible (Roa *et al.*, 2009). La estructura arbórea es evaluada a través del índice de diversidad estructural, el cual depende de las especies presentes, las características del medio físico, el historial y el tratamiento silvícola, donde el diámetro medio, la distribución diamétrica, la altura y la densidad, son características importantes (Del Rio *et al.*, 2003). Otra función importante de los SAFC es el almacenamiento de C en el suelo y la

vegetación, dicha acumulación se puede estimar a partir del cálculo de los volúmenes de biomasa, tanto de los árboles de cacao, de sombra, así como de especies acompañantes, a través de ecuaciones alométricas; las cuales son afectadas por factores como el manejo, la edad de los árboles, así como de sus diámetros y alturas (Somarriba *et al.*, 2013; Cerda *et al.*, 2013). En Tabasco se han desarrollado algunos estudios que se han enfocado al conocimiento de la estructura y diversidad, así como la relación de ambos con la edad de los SAFC (Ramírez *et al.*, 2013; Gutiérrez *et al.*, 2016). Sin embargo, poco se ha considerado la influencia de otros factores importantes, como el suelo, el cual puede llegar a jugar un rol importante sobre la distribución espacio-temporal de la diversidad, estructura arbórea y la captura de C de los SAFC.

Objetivo

Evaluar la diversidad, la estructura de especies arbóreas y la capacidad de almacenamiento de C en la biomasa aérea en el SAFC en cuatro grupos de suelo en la región de la Chontalpa en el estado de Tabasco, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en los municipios de Cárdenas, Jalpa de Méndez y Comalcalco, en el estado de Tabasco. Sus coordenadas geográficas son 18° 00' 33.46" y 18° 15' 34.05" N, y 93° 40' 36.69" y 93° 04' 57.88" O. El clima es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano, una temperatura media anual de 26 °C y una precipitación anual de 2500 mm (INEGI, 2016).

Selección de sitios de muestreo

Para seleccionar los sitios de muestreo, se georreferenciaron aproximadamente 50 parcelas de cacao; las coordenadas de dichas parcelas fueron ubicadas en una imagen de satélite Spot, lo que permitió generar un mapa de cobertura vegetal que precisa la extensión y ubicación de la superficie cultivada con cacao. Posteriormente, mediante la técnica de álgebra de mapas, el mapa de distribución de los SAFC se sobrepuso a un mapa de distribución de suelos escala 1:250,000 elaborado por Jiménez *et al.* (2013). De acuerdo con este mapa, los SAFC se

establecen sobre suelos Cambisoles (CM), Vertisoles (VR), Fluvisoles (FL) y Gleysoles (GL), por lo que en cada grupo de suelo, se seleccionaron de manera aleatoria cuatro unidades de muestreo (UM) de 1000 m² (20 x 50 m).

Muestreo de la vegetación

En cada unidad de muestreo se realizó un inventario, donde se registraron las especies arbóreas, y de cada una de ellas se midió el diámetro normal (1.3 m sobre el suelo), tanto de los árboles de sombra, como la de los árboles de cacao (0.3 m sobre el suelo), para ello se utilizó una cinta diamétrica, mientras que la altura fue estimada mediante una regla de Christensen. Se registraron los nombres comunes de las especies arbóreas y se tomaron muestras botánicas para determinar los nombres científicos y su clasificación taxonómica a nivel de familia, género y especie.

Análisis de diversidad, uniformidad y similitud

Para comparar la diversidad de especies arbórea en el sistema agroforestal cacao (SAFC), se calculó el índice de Shannon-Wiener ($H' = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$), donde la cantidad de p_i es la proporción (o abundancia relativa) de cada especie en la población, este índice considera que los individuos se muestrean al azar a partir de una población indefinidamente grande, también asume que todas las especies están representadas en la muestra (Magurran, 1989; Somarriba, 1999, Carreón y Valdez, 2014).

Asimismo, se evaluó el índice de uniformidad o también llamado índice equidad (E) de las especies, se define como la relación entre diversidad observada y diversidad máxima, esta medida de uniformidad (E) queda representada por la ecuación $E = H' / \ln(S)$ (Pielou, 1969; Magurran, 2004; Zarco *et al.*, 2010) donde H' es el índice de Shannon-Wiener y S el número total de especies, el valor de E se sitúa entre 0 y 1 donde valores cercanos a 1 representan condiciones de igualdad en la abundancia entre las especies de una población, mientras que los valores cercanos a 0 indican la predominancia de una sola especie. La semejanza florística se calculó mediante el Coeficiente de Sorensen $S_i = (2C / (A + B))$, que se basa en la relación presencia ausencia de especies entre dos sistemas (Stilling, 1999) donde A es el número de especies encontradas en la comunidad A , B es el número de especies encontradas

en la comunidad B y C es el número de especies comunes en ambos sistemas (Sorensen, 1948; Magurran, 2004; Zarco *et al.*, 2010; Carreón y Valdez, 2014). Para determinar la existencia de diferencias significativas entre los valores de H' del SAFC, se aplicó el método de la t modificada de Hutcheson. Para calcular el valor de t se realizaron los siguientes cálculos $t = (H_1 - H_2) / (\text{Var}H_1 + \text{Var}H_2)^{1/2}$ donde H_1 es el valor del índice de diversidad de Shannon para comunidad 1; H_2 es el valor del índice de diversidad de Shannon para comunidad 2. Se calcularon los grados de libertad $gl = \frac{\text{Var}H_1 + \text{Var}H_2}{((\text{Var}H_1)^2/N_1) + ((\text{Var}H_2)^2/N_2)}$ donde $\text{Var}H_1$ es la varianza del índice de diversidad de Shannon en la comunidad 1; $\text{Var}H_2$ es la varianza del índice de diversidad de Shannon en la comunidad 2. La varianza de los H' de cada SAFC se determinó mediante la ecuación $\text{Var}H' = [(\sum p_i (\ln p_i)^2) - (\sum p_i \ln p_i)^2] / N - (S - 1/2N^2)$ donde p_i es la proporción de individuos de la especie i; S número de especies; N número total de individuos (Magurran, 1988; Carreón y Valdez, 2014).

Para conocer la estructura del SAFC, se calcularon valores de densidad, dominancia y frecuencia por especie, con el fin de obtener el Índice de Valor de Importancia (IVI = densidad relativa + dominancia relativa + frecuencia relativa) (Curtis y McIntosh, 1951; Villavicencio y Valdez, 2003). A partir de las variables diámetro normal (DN) y altura total (HT) de los árboles se determinó la estructura vertical y horizontal siendo representadas en histogramas de frecuencias.

Carbono en la biomasa aérea del SAFC

Para cuantificar el C de la biomasa arbórea asociada al SAFC, se utilizó la ecuación propuesta por Chave *et al.* (2014), esta ecuación tiene la ventaja de que puede extrapolarse a diferentes tipos de vegetación tropical, sin verse afectada negativamente por factores ambientales o regionales y se describe como: $B = 0.0673 * (\rho D^2 H)^{0.976}$, en donde B es la biomasa aérea estimada (kg), D es el diámetro normal (cm); H es la altura total (m) y ρ es la densidad de la madera (g cm^{-3}). Los valores de densidad de la madera se obtuvieron de dos fuentes, la Global wood density database (Zanne *et al.*, 2009) y de Ordoñez *et al.* (2015). La densidad de la madera es propia de cada especie, depende de la cantidad y tipo de elementos celulares que la constituyen, además que le confiere atributos físicos y mecánicos, tales como dureza, peso, resistencia al impacto, así como la abrasión además estas

características están asociadas a las condiciones climáticas que prevalecen en cada región donde crece la vegetación (Ordoñez *et al.*, 2015).

La biomasa arbórea para cacao se estimó mediante la ecuación $\text{Log } B = -1.684 + 2.158 * \text{Log} (d30) + 0.892 * \text{Log} (H)$, consultada en la bibliografía de Cerda *et al.* (2013), en donde B es la biomasa (kg); d30 es el diámetro (cm) del tronco a 30 cm del suelo y H es la altura total (m).

Para el cálculo del contenido de C, se empleó la ecuación $C = B * FC$ (IPCC, 2003; Cerda *et al.*, 2013), donde C es el carbono en la biomasa arbórea expresada en kg, B es la biomasa arbórea expresada en kg y FC es el factor de la fracción de C igual a 0.5.

Análisis de los datos

Para los análisis estadísticos de diversidad, uniformidad (E) y similitud, los SAFC muestreados se agruparon según sus rangos de edad en tres categorías: 10-15 años, 20-35 años y ≥ 40 años; asimismo esas mismas parcelas se agruparon según grupo de suelo, clasificándose en CM, VR, FL y GL. El análisis de significancia ($p < 0.05$) de diversidad se realizó con la t de Hutchenson (Magurran, 1988; Carreon y Valdez, 2014). Se calculó el índice de valor de importancia (IVI), la estructura vertical y horizontal se caracterizó mediante estadística descriptiva. El contenido de carbono se analizó mediante estadística no paramétricas usando la prueba de Kruskal Wallis (Siegel y Castellan, 1995) con un nivel de significancia de ($P < 0.05$), en el programa estadístico STATGRAPHICS® centurión XVI (StatPoint Technologies, 2010).

Resultados

Diversidad florística

De manera general se registraron 524 árboles sombra, agrupados en 37 géneros y 39 especies, y 24 familias en el SAFC evaluado. Las especies con el mayor número de individuos fueron *Diphysa robinoides*, *Erythrina americana*, *Colubriña arborescens*, *Cedrela odorata* y *Tabebuia rosea*. Las familias mayor representadas en el SAFC, fueron Fabaceae, Myrtaceae, Moraceae.

Diversidad, equidad (E) y similitud

El índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') indica que a mayor edad del sistema, el número de especies se incrementa, por lo que los SAFC >40 años, registraron la mayor diversidad de especies ($H'=2.6$), seguido de los rangos de edad de 10-15 y 20-35 años, los cuales registraron un similar índice H' de 2.1. Las pruebas pareadas de significancia por el método de Hutcheson (t modificada) para H' , indican que existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las categorías de edad 20-35 y >40 años, seguido de 10-15 y >40 años, mientras que para la categoría 10-15 y 20-35 años, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. El presente estudio indica que el valor de equidad de especies (E) en los SAFC >40 años son ligeramente más equitativos en el número de individuos por especie ($E = 0.49$), seguidos de las categorías de 20-35 y 10-15 años, con valores de E de 0.42 y 0.41, respectivamente. Las pruebas entre pares para determinar el coeficiente de similitud florística de Sorenson (S_i), consiste en comparar el porcentaje de especies que se comparten entre dos poblaciones determinadas, por ejemplo, para el caso de los SAFC de los rangos de edad de 10-15 y 20-35 años respectivamente, el índice S_i fue de 0.41; es decir que 41% de las especies presentes en estas dos poblaciones son similares. El S_i correspondiente al comparativo entre los SAFC de 10-15 años con respecto a los de >40 años es de 0.62; mientras que entre los SAFC 20-35 años con respecto a los SAFC >40 años es de 0.52.

Los mayores índices de valor de importancia (IVI) en los SAFC jóvenes (10-15 años) correspondieron a *Diphysa robinoides* Benth, *Erythrina americana* Mill. (Fabaceae), *Colubrina arborescens* Mill. Sarg. (Rhamnaceae), *Cupania dentata* (Sapindaceae) y *Cocos nucifera* L. (Palmaceae), con 64.4, 42.2, 27.5, 23.5 y 21.2, respectivamente. En los SAFC intermedios (20-15 años), las especies más importantes fueron *Erythrina americana* Mill. (Fabaceae), *Cedrela odorata* L. (Meliaceae), *Tabebuia rosea* [Bertol] DC. (Bignonaceae), *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae) y *Gmelina arborea* Roxb (Lamiaceae) con IVI's de 80.1, 48.4, 30.1, 22.4 y 12.8, respectivamente. En los SAFC más viejos (>40 años), *Diphysa robinoides* Benth (Fabaceae), *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg. (Rhamnaceae), *Erythrina americana* Mill. (Fabaceae), *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) y *Tabebuia*

rosea [Bertol] DC. (Bignonaceae) fueron las más importantes con IVI's de 53.7, 29.2, 29, 26.5 y 18.5, respectivamente. El análisis por grupos de suelo, indica que el índice H' fue de 2.3, 2.1, 2 y 2 para los grupos GL, FL, CM y VR, respectivamente; mientras que los valores de E fueron 0.82, 0.66, 0.7 y 0.68 para dichos grupos de suelo. Las pruebas entre pares por grupo de suelo, reveló una similitud florística (S_i) de 61% para CM y VR, 44% para CM y FL, 41% para CM y GL, 46% para VR y FL, 50% para VR y GL y 58% para FL y GL. Las pruebas pareadas de significancia por el método de Hutcheson para H' indican que no existen diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los grupos de suelos. El mayor número de especies se registra en los FL con 24 especies reportadas, de las cuales *Diphysa robinoides* Benth. (Fabaceae), *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg. (Rhamnaceae), *Tabebuia rosea* [Bertol] DC. (Bignonaceae), *Mangifera indica* L. (Anacardiaceae) y *Pimenta dioica* L. Merr. (Myrtaceae) son las más importantes, con IVI's de 100.5, 40.2, 18.8, 18.0 y 16.1, respectivamente. Le siguen en número de especies, los VR con 19 registros, de las cuales *Erythrina americana* Mill. (Fabaceae), *Tabebuia rosea* [Bertol] DC. (Bignonaceae), *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae), *Erythrina poeppigiana* (Walp) O.F.Cook (Fabaceae) y *Cedrela odorata* L. (Meliaceae), son las principales, con IVI's de 78.5, 35.3, 31.9, 30.1 y 26.7, respectivamente. Los suelos que soportan menos diversidad son los CM, con 17 especies registradas, entre las que destacan *Cedrela odorata* L. (Meliaceae), *Erythrina americana* Mill. (Fabaceae), *Erythrina poeppigiana* (Walp) O.F.Cook (Fabaceae), *Cecropia obtusifolia* Bertol. (Urticaceae) y *Gmelina arborea* Roxb. (Lamiaceae) con IVI's de 75.4, 42.6, 39.8, 27.4 y 17.2, respectivamente. En los suelos GL, al igual que en los anteriores, se identificaron 17 especies, entre las que destacan *Diphysa robinoides* Benth (Fabaceae), *Tabebuia rosea* [Bertol] DC. (Bignonaceae), *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg. (Rhamnaceae), *Citrus sinensis* (L.) Osb. (Rutaceae) y *Cupania dentata* (Sapindaceae) con IVI's de 60.9, 26.8, 16.9, 19.8 y 15.9, respectivamente.

Estructura vertical y horizontal de la vegetación del SAFC

Las clases de altura para árboles sombra por categoría de edad, presentaron una distribución donde la mayoría se concentraron en las clases de 6-9 y 9-12 m; esto obedece a que en las tres categorías de edad, las mayores proporciones de altura (98, 95 y 85 %) midieron menos de 15 m (Figura 1), mientras que la distribución por

clases diamétricas para las tres categorías de edad, muestran que la mayor proporción de árboles (70.4, 82.6 y 69.1 %) se concentra hasta la clase diamétrica de 16 a 24 cm (Figura 2).

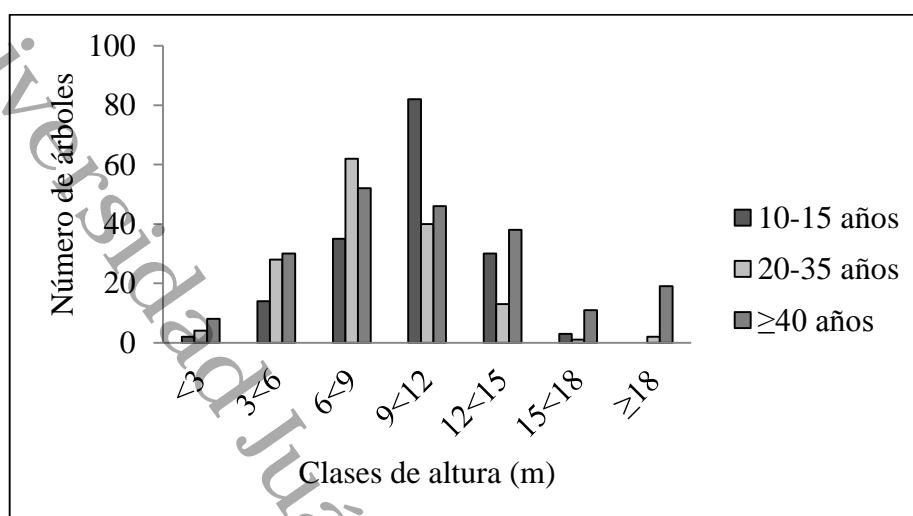


Figura 1. Número de árboles sombra distribuidos por clase de altura según la edad de los SAFC.

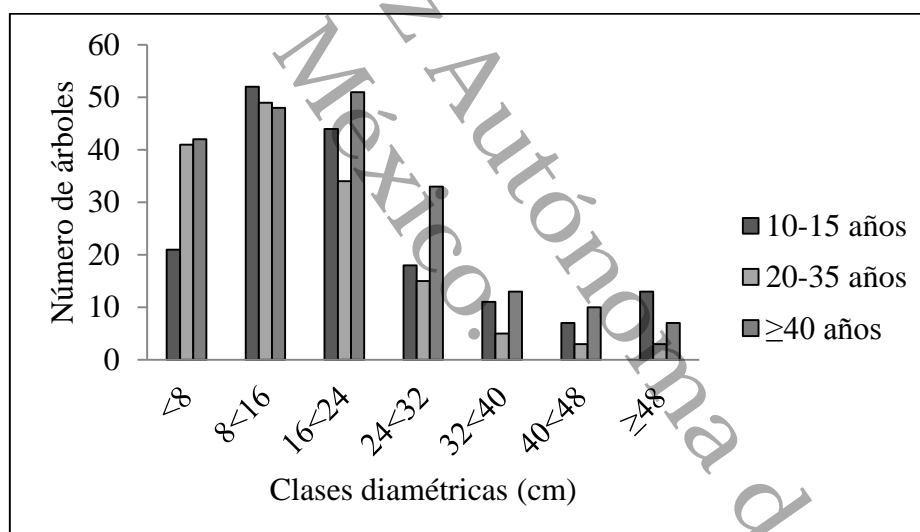


Figura 2. Número de árboles sombra distribuidos por clase diamétrica según la edad de los SAFC.

La densidad promedio de árboles sombra en el área de estudio fue de 332 árboles para la categoría de edad 10-15 años, con un rango de 150-710 árboles ha⁻¹; de 300 árboles para la categoría 20-35 años, con un rango de 40-500 árboles ha⁻¹, y de 340 árboles para la categoría ≥40 años, con un rango de 120-640 árboles ha⁻¹. La altura promedio de los árboles sombra fue de 9.9 m con un rango de 1 hasta 22 m y un diámetro promedio de 21.4 con un rango de 2.5 hasta 65.3 cm. La mayor

área basal (AB) se encontró en las clase de edad de 10-15 años ($16.7 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), seguido de ≥ 40 años ($14.9 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), mientras que la clase de 20-35 años presentó el valor más bajo de AB con $8.4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. A nivel estructural, los SAFC de 25 años presentaron mayor AB, con un promedio de $22.7 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, que se debe a una mayor densidad de árboles de *Erythrina poeppigiana* y *Samanea saman*, especies que presentaron los mayores diámetros. *Cedrela odorata* se presentó en las tres clases de edad.

Las clases de altura para árboles de sombra por grupo de suelo, presentaron una distribución similar a la observada cuando el análisis se realizó por rangos de edades. De nueva cuenta, la mayoría de las especies se concentraron entre los rangos de 3-6, 6-9, 9-12 y 12-15 m respectivamente (Figura 3); lo que significa que los árboles que se encuentran en los rangos de altura antes mencionados, presentes en los diferentes grupos de suelo, alcanzan el 88, 100, 96 y 89 % en los CM, VR, FL y GL respectivamente. Por su parte, la distribución por clases diamétricas por grupos de suelo, muestran que el 85, 79, 97 y 82 % de los árboles en los CM, VR, FL y GL respectivamente, se concentran en la clase diamétrica de 24-32 cm (Figura 4).

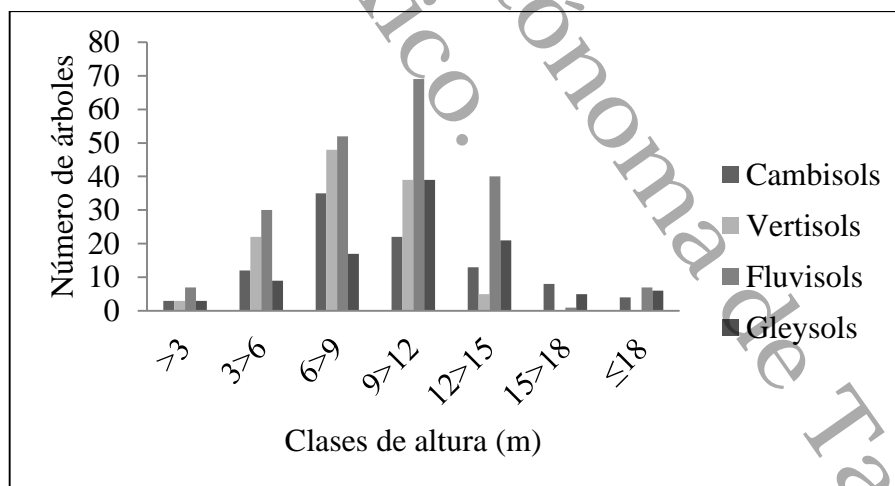


Figura 3. Número de árboles sombra distribuidos por clases de altura en el SAFC según grupos de suelos.

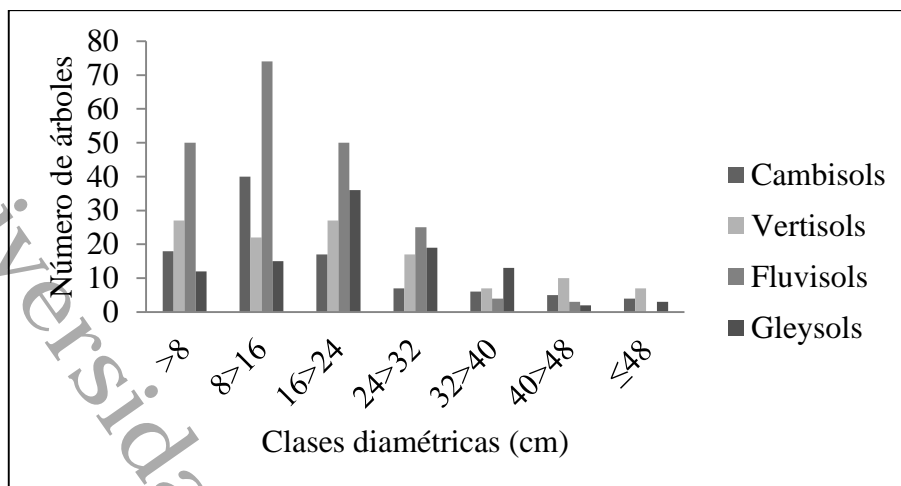


Figura 4. Número de árboles sombra distribuidos por clases diamétricas en el SAFC según grupos de suelos.

Los SAFC establecidos en los suelos FL presentaron la mayor densidad con 553 árboles de sombra ha^{-1} , en tanto que la menor densidad se registró en los CM con 250 árboles ha^{-1} .

Los SAFC establecidos en los FL presentaron el valor más alto de AB con 28.9 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$, le siguen los de VR y CM con 24.5 y 21.7 $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$, respectivamente.

La altura promedio de los árboles de cacao fue de 4.4 m, variando de 1 a 8 m y La densidad promedio fue de 613 árboles ha^{-1} , variando de 570 a 698 árboles ha^{-1} .

Carbono en la biomasa aérea de los SAFC

El C acumulado en el arbolado de los SAFC >40 años, registró el valor más alto con 51.35 Mg C ha^{-1} , le siguen las categorías de 10-15 y 20-35 años, con 41.17 y 33.1 Mg C ha^{-1} respectivamente (Figura 5).

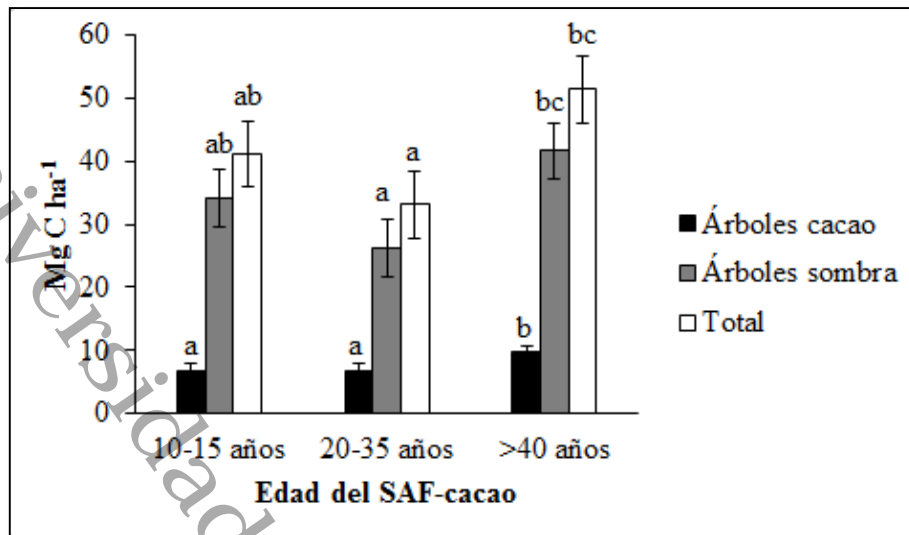


Figura 5. Carbono de la biomasa aérea por clase de edad del SAF-cacao. Letras diferentes entre edades representan diferencia significativa ($P < 0.05$).

Al comparar la cantidad de C de la biomasa aérea por grupo de suelo, se determinó que en los suelos FL, GL, VR y CM, los SAF-cacao almacenan 56.51, 41.96, 40.94 y 30.45 Mg C ha⁻¹, respectivamente (Figura 6).

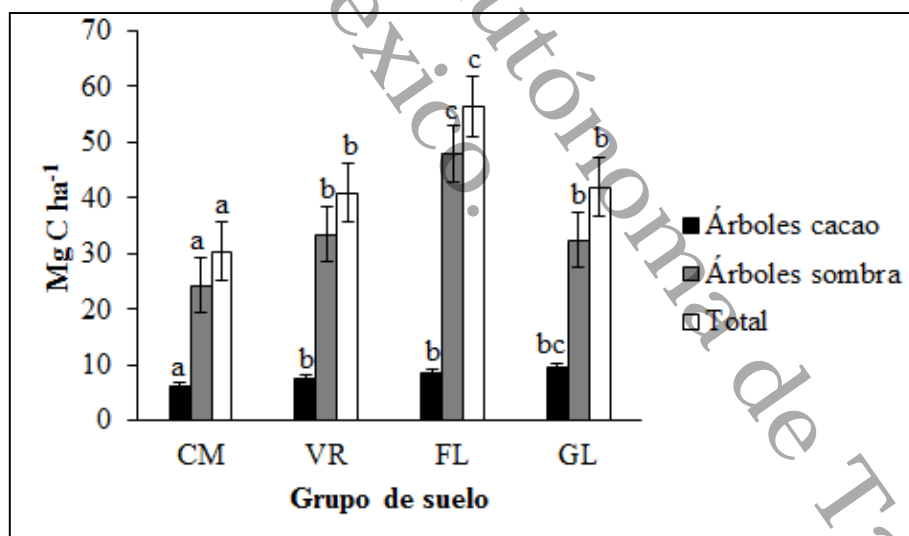


Figura 6. Carbono almacenado en la biomasa de los árboles en el SAF-cacao por grupo de suelo. Letras diferentes entre edades representan diferencia significativa ($P < 0.05$).

Los árboles de cacao almacenaron entre 6.22 y 9.6 Mg C ha⁻¹, mientras que los árboles de sombra entre 24.33 y 47.94 Mg C ha⁻¹. Los suelos Fluvisoles acumulan

mayor cantidad de C en la biomasa arbórea, debido a que los SAFC establecidos sobre este grupo de suelo registraron una mayor densidad arbórea y AB.

Discusión

La diversidad de especies de los SAFC entre grupos de suelos es similar; mientras que al compararlos según rangos de edades, se detectan diferencias estadísticamente significativas, siendo los SAFC >40 años, los que son más diversos con respecto a los SAFC de 10-15 y 20-35 años respectivamente. Estos resultados son similares con lo reportado por otros investigadores, que han realizado trabajos en el estado de Tabasco. Gutiérrez *et al.* (2016), señalan que los SAFC >35 años registran un mayor número de especies, mientras que Ramírez *et al.* (2013) afirman que los SAFC más viejos, albergan una mayor diversidad de especies con respecto a los más jóvenes. Los resultados de esta investigación indican que la diversidad florística entre los SAFC de 10-15 y 20-35 años es similar estadísticamente. En los SAFC la actividad de aves y roedores contribuyen a la dispersión de especies florísticas, por lo que con el paso de los años, el número de especies se incrementan (Gutiérrez *et al.*, 2016). Sin embargo, en los SAFC, por tratarse de sistemas perturbados, tanto la presencia como la distribución de las especies, también obedecen a un aspecto cultural y de manejo. Por una parte, los productores eligen las especies que utilizan como sombra, e identifican y eliminan aquellas que no les ofrecen buenos resultados. Aunque el presente estudio no profundiza acerca del historial de manejo de los SAFC, algunas investigaciones indican que estos sistemas mantienen su productividad entre 25-30 años (Hernández *et al.*, 2015), por lo que algunas especies de árboles de sombra que presentan una muerte temprana son sustituidos, tal es el caso de *Erythrina americana* Mill., que requiere una renovación gradual debido a que su ciclo de vida es de apenas 12 años (Córdova *et al.*, 2001). Por lo tanto un SAFC considerado como viejo, puede contener un arbolado renovado de menor edad, con respecto a un SAFC considerado más joven. Al respecto, Córdova *et al.* (2001), señalan que en los SAFC más viejos incluyen una mayor diversidad de especies, que involucran maderables, frutales y condiméntales como árboles de sombra, mientras que en la actualidad ya no es frecuente observar dicha diversidad. Caso contrario se observa en los SAFC del estado de Chiapas, donde además de la familia Fabaceae, que es la dominante, aún mantienen la tradición de incluir árboles frutales de *Mangifera*

indica y *Pouteria sapota* como sombra (Roa *et al.*, 2009). De acuerdo con Medrano *et al.* (2017), la diversidad de especies es mayormente afectada por las variaciones climáticas y edáficas, que ocurren entre sitios situados a diferentes gradientes altitudinales. Esto explica parcialmente por qué no se observaron diferencias estadísticas entre los grupos de suelos al comparar los valores del índice H', ya que toda la franja de la zona productora de cacao en el estado de Tabasco, se sitúa en un solo paisaje geomorfológico, la planicie fluviodeltaica inactiva que se ubica entre los 2-40 m de altitud, en donde se han formado suelos FL, CM, VR y GL (Zavala-Cruz *et al.*, 2016). Dichos grupos de suelos presentan buena fertilidad, debido a sus altos contenidos de arcillas y materia orgánica; sin embargo, el nivel de fertilidad del suelo no siempre redundó en una mayor diversidad florística, ya que hay sitios como las tierras de barbecho, que aunque poseen un suministro de nutrientes relativamente bueno, presentan una diversidad de especies baja, mientras que hay otros sitios como las praderas, que aunque sus nutrientes pueden estar agotados, muestran una alta riqueza florística. En todo caso, dicha riqueza puede estar más asociada a la edad de los sistemas, así como al manejo de los mismos (Chmolowska *et al.*, 2016). Dado que no se observaron diferencias estadísticas en los valores de los índices H' y E entre los diferentes grupos de suelos, y que dichos grupos se ubican en un solo paisaje geomorfológico. De acuerdo con Ramírez *et al.* (2013), los SAFC ≥ 50 años que tienen presencia de *Colubrina arborescens*, *Musa* sp., *Gliricidia sepium*, *Diphysa robinoides*, *Guazuma ulmifolia* y *Cedrela odorata*, suman solamente el 44 % del total del índice de valor de importancia (IVI), mientras que en los SAFC más jóvenes (30 años), *Samanea saman*, *Erythrina* sp., *Diphysa robinoides* y *Guazuma ulmifolia*, representan el 52 % del IVI. La presencia de especies como *Diphysa robinoides*, *Erythrina americana*, *Colubrina arborescens*, *Cedrela odorata*, *Gliricidia sepium* y *Samanea saman* en los SAFC de Tabasco, dan como resultado que las alturas promedio del componente arbóreo sean mayores a 10 m, con variaciones de 2 hasta 35.5 m (Gutiérrez *et al.*, 2016). En plantaciones de 30 años, las alturas máximas fueron de 37, 30 y 17 m para *Samanea saman*, *Guazuma ulmifolia* y *Erythrina* sp, respectivamente; en tanto que en plantaciones de 50 años, las alturas reportadas son de 30, 30, 12, 35, y 30 m para *Colubrina arborescens*, *Gliricidia sepium*, *Musa* sp, *Guazuma ulmifolia* y *Cedrela odorata*, respectivamente (Ramírez *et al.*, 2013).

En la presente investigación, las características dasométricas de algunas especies presentes son las que determinan las variables estructurales de los SAFC. Al respecto, Concha *et al.* (2007), señalan que la edad es un factor importante en el almacenamiento del C de los SAFC, por lo que los sistemas de 5, 12 y 20 años de edad, pueden almacenar cantidades crecientes de C en la biomasa aérea de 14.23, 35.5 y 32.4 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Ortiz *et al.* (2008) reportan entre 43 y 62 Mg C ha⁻¹ en SAFC de 25 años, mientras que en plantaciones más jóvenes de 18 y 35 años, se reportan solamente 28.8 y 33.6 Mg C ha⁻¹, respectivamente (Andrade *et al.*, 2013). Aunque son varias las investigaciones que mencionan, la importancia de la edad del SAFC en el almacenamiento de C de la biomasa aérea. La edad del SAFC por sí misma no es determinante en la cantidad de C almacenado, sino que la densidad de árboles en el sistema es un factor más influyente, al respecto Poveda *et al.* (2013) indican que un SAFC de 19 años puede acumular 54.32 Mg C ha⁻¹, cantidad superior a los 45.72 Mg C ha⁻¹ que acumulan los SAFC de 21 años, aun cuando estos últimos presentan menor densidad de árboles, respecto a los SAFC más jóvenes. La presente investigación respalda este último argumento. Dado que a mayor cantidad de biomasa mayor cantidad de C almacenado, los SAFC que presentan el arbolado de mayores clases diamétricas y alturas, son los que acumulan mayor biomasa y C, por lo que la edad de los SAFC no es el factor más determinante en el almacenamiento del C. En el presente estudio, los resultados indican que los árboles de cacao almacenan entre 6.9 y 9.7 Mg C ha⁻¹, mientras que los árboles de sombra acumulan entre 26.23 y 41.6 Mg C ha⁻¹, resultados que son similares a los reportados por Somarriba *et al.* (2013), quienes cuantificaron una cantidad de 49 Mg C ha⁻¹ en la biomasa aérea del arbolado, de éstos, 9 Mg C ha⁻¹ corresponden a los árboles de cacao, mientras que 32 Mg C ha⁻¹ se acumulan en los árboles de sombra. Por ello, Concha *et al.* (2007) indican que la especie de árbol de sombra y el manejo son factores importantes en el almacenamiento del C de la biomasa aérea en los SAFC. Por lo tanto, para comprender los procesos que conllevan a la acumulación del C de la biomasa aérea de estos sistemas, es necesario considerar los factores antes mencionados. Al respecto Bradford *et al.* (2008) señalan que la edad de los árboles influyen tanto en los almacenes como en los flujos de C, por lo que para modelar ambos, es necesario determinar el periodo crítico en el que los cambios ocurren. Esto es importante, ya que como se mencionó anteriormente, los árboles de cacao se renuevan cada 25-30 años, mientras que

los árboles de sombra cada 12 años. En ese sentido, más que considerar la participación de los árboles de cacao como un almacenamiento de C, se debería interpretar como un flujo, por lo que es importante considerar la dinámica de renovación en el SAFC como un operador importante en el ciclo biogeoquímico del C. Un ejemplo de lo anterior es la *Erythrina americana* Mill, la cual puede ganar rápidamente biomasa aérea y absorber C, sin que esto llegue a significar una captura de largo plazo, ya que generalmente su renovación ocurre cada 12 años (Córdova *et al.*, 2001). Existen otras especies de mayor duración como *Samanea saman*, que pueden ganar una mayor cantidad de biomasa, por lo que pueden almacenar una mayor cantidad C, por un mayor lapso de tiempo; sin embargo, estos árboles de sombra no son muy aceptados por los productores (Córdova *et al.*, 2001).

Si se toma en cuenta que los árboles de sombra más comunes en la región son *Erythrina americana* Mill., *Diphysa robinoides* Benth y *Colubrina arborescens* Mill. Sarg., especialmente en los municipios de Comalcalco y Jalpa de Méndez, es probable que un SAFC > 40 años, no necesariamente sea una plantación vieja, ya que éstas pueden estar involucrando uno o dos ciclos de renovación, y con ello aumentar su potencial de almacenamiento de C.

El grupo de suelo es otro factor clave en la acumulación del C en el SAFC. Según Ramos *et al.* (2004), los suelos FL son considerados como los mejores suelos para el cultivo de cacao, debido a sus buenas características químicas y físicas, en particular los Eutrico-Fluvisoles, que son los más utilizados para el establecimiento de este cultivo en Tabasco. Al respecto Saj *et al.* (2013) indican que la capacidad de almacenamiento de C de los SAFC depende de la ubicación geográfica y los sistemas de manejo, más que de la edad y crecimiento de los árboles de cacao; sobre todo porque el componente arbóreo correspondiente a los árboles de cacao no contribuye significativamente a la capacidad de almacenamiento del sistema. Sin embargo, es necesario precisar que, independientemente de la poca contribución que tienen los árboles de cacao en el almacenamiento del C, es importante resaltar la importancia que éstos tienen en otros servicios ambientales, principalmente en el de conservación de la biodiversidad.

Por otra parte, Aponte (2011) indica que en un sentido biológico, el suelo posee una gran diversidad de macro y microorganismos responsable de la descomposición de la materia orgánica, reciclado y mineralización de nutrientes, por lo tanto es un subsistema imprescindible para comprender la organización y funcionamiento de los ecosistemas, sistemas forestales y sistemas agroforestales. Al ubicar espacialmente los SAFC en el mapa de grupos de suelos (Jiménez, 2013), se determinó que los SAFC en el municipio de Cárdenas se distribuyen principalmente sobre CM>FL>VR, en Comalcalco sobre FL> CM>GL y en Jalpa de Méndez sobre FL>GL. Determinar cuáles son las especies de árboles de sombra que se utilizan, la diversidad de especies, la estructura horizontal y vertical de las especies y la distribución de los SAFC en los distintos grupos de suelos, permite la comprensión de la producción de biomasa aérea, así como del almacenamiento y flujos de C de dichos SAFC en cada municipio.

Conclusión

Los SAFC de los municipios evaluados albergan 24 familias, 37 géneros y 39 especies. Las familias más frecuentes son Fabaceae, Myrtaceae y Moraceae. Las especies más importantes son *Diphysa robinoides* Benth, *Erythrina americana* Mill. y *Colubrina arborescens* (Mill). Las edades promedio de los SAFC son 21.6, 27 y 33.6 años para los municipios de Jalpa de Méndez, Cárdenas y Comalcalco, respectivamente. Los índices de diversidad de Shannon-Wiener y de similitud florística de Sorenson según grupos de suelos son iguales estadísticamente. El C de la biomasa aérea se almacena principalmente en SAFC>40 años, sobre suelos Fluvisoles. Los árboles de sombra y de cacao almacenan 24.33- 47.94 y 6.22-9.7 Mg C ha⁻¹ en la biomasa aérea, respectivamente.

REFERENCIAS

- Andrade, H. J., Figueroa, J. M. D. P. & Silva, D. P. (2013). Almacenamiento de carbono en cacaotales (*Theobroma cacao*) en Armero Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroaliment*, 1, 6-10.
- Aponte, C. (2011). Interacciones planta-suelo en un bosque mediterráneo. *Revista Ecosistemas*, 20, 2-3.
- Carreón, S. R. J. & Valdez, H. J. I. (2014). Estructura y diversidad arbórea de vegetación secundaria derivada de una selva mediana subperennifolia en Quintana Roo. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20 (1), 119-130. doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.06.023
- Cerda, B.R., Espin, C.T. & Cifuentes, M. (2013). Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforesteria en las américas*, 49: 33-41.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., et al. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190. doi:10.1111/gcb.12629
- Chmolowska, D., Kozak, M. & Laskowski, R. (2016). Soil physicochemical properties and floristic composition of two ecosystems differing in plant diversity: fallows and meadows. *Plant and Soil*, 402 (1-2), 317-329.
- Concha, J. Y., Alegre, J. C. & Pocomucha, V. (2007). Determinación de las reservas de Carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en el departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*, 6 (1,2), 75-82.
- Córdova, A. V., Hernández, M. S., Chulim, N. E., Layalle, A. M., Castro, E. S., Saldaña, T. M. & García, C. F. O. (2001). Factores que afectan la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el ejido Francisco I. Madero del plan Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 17 (34), 93-100.
- Del Río, M., Montes, F., Cañellas, I. & Montero, G. (2003). Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales*, 12 (1), 159-176.
- Gutiérrez, F. S., Pérez-Flores, J., Olán, J. J. O., Sánchez, Á. S. & Ruiz-Rosado, O. (2016). Estructura arbórea del sistema agroforestal cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14 (Núm. esp.) 2695-2709.

- INEGI, 2016. Anuario estadístico y geográfico de Tabasco. 742 p. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGPEF_2016/702825087357.pdf
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Kanagawa, Japon, IGES. 595 p. Recuperado de http://www.ipcc-ggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf
- Jadán, O., Quizhpe, W., Pacheco, E., Aguirre, Z., González, M., Ponce, E. & Peña, D. (2017). Riqueza florística y carbono almacenado en tres pisos altitudinales de bosques amazónicos, Zamora Chinchipe, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 7 (1). 1-16
- Jiménez, R, R. (2013). Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. M.SC. Tesis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas Tabasco, México. Recuperado de http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2213/Jimenez_Ramirez_R_MC_Produccion_Agroalimentaria_Tropico_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Magurran, A. E. (2004). Measuring biological diversity. Oxford: Blackwell Science.
- Martínez, S. J. L. (2016). Comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México. *Madera y bosques*, 22 (2), 29-40.
- Medrano, M. M.J., Javier, H., F., Corral, R., S, Nájera, L., J.A. (2017). Diversidad arbórea a diferentes niveles de altitud en la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8 (40), 57-68.
- Ordóñez, D. J.A.B., A. Galicia N., N.J. Venegas M., T. Hernández T., M.J. Ordóñez D. & Dávalos, S. R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques* 21 (Núm. esp.), 77-126.
- 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 en las Américas*, 46: 26-29.
- Poveda, V. A., Medina, L., Bustillos, C. C., & Rolando López, A. (2013). Almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao en Waslala, Nicaragua. *Agroforestería en las Américas*, 49: 42-50.

- Ramírez, A., García L. E., Obrador O. J. J., Ruiz R. O. & Camacho C, W. (2013). Diversidad florística en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 29 (3), 215-230.
- Ramos R. R., Palma L. D. J., Ortiz S. C. A., Ortiz G. C. F. & Díaz-Padilla, G. (2004). Cambios de uso de suelo mediante técnicas de sistemas de información geográfica en una región cacaotera. *Terra Latinoamericana*, 22 (3), 267-278.
- Roa, R. H. A., Salgado, M. M. G., & Álvarez, H.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.
- Saj, S., Jagoret, P., Ngogue H.T. (2013). Carbon storage and density dynamics of associated trees in three contrasting *Theobroma cacao* agroforests of Central Cameroon. *Agroforestry systems* 87 (6), 1309-1320.
- Sánchez, H., R., Mendoza, P., J.D. & Salcedo, P. E. (2013). Los sistemas Agroforestales: una alternativa para el manejo sustentable de bosques y agroecosistemas. En: Salcedo, P., E., Hernández, A., E., Escoto, G., T. & Díaz, E., N. (Editores), Los recursos forestales del Occidente de México: Biodiversidad, manejo, producción, aprovechamiento y conservación, Tomo II. (p. 355-371). Guadalajara, Jalisco. Editorial Universidad de Guadalajara, Eduardo Salcedo Pérez, los Autores.
- Siegel, S., Castellan, N.J. 1995. Estadística no paramétrica: aplicada a las ciencias de la conducta, 4ta ed. México. Trillas 437p.
- Somarriba, E. (1999). Diversidad Shannon. *Agroforestería en las Américas* 6 (23), 72-74.
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Dávila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Ávila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., Deheuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, ecosystems & environment*, 173, 46-57.
- StatPoint Technologies, 2010 Statgraphics centurion xvi manual de usuario. Inc. STATGRAPHICS.
- Stiling, P. 1999. Ecology; Theories and applications. 3rd edition. New Jersey, USA. Prentice Hall.
- Sturges, H. (1926). The choice of a class-interval. *Journal of American Statistical Association*, 21 (153), 65–66.
- Valenzuela-Córdova, B., Mata-Zayas, E. E., Pacheco-Figueroa, C. J., Chávez-Gordillo, E. J., Díaz-López, H. M., Gama, L., & Valdez-Leal, J. D. D. (2015). Potencial

ecoturístico del agrosistema cacao (*Theobroma cacao* L.) con monos saraguatos (*Alouatta palliata* gray) en la Chontalpa, Tabasco. *Agroproductividad*, 8(5).

Zanne, A.E., Lopez-Gonzalez, G.*, Coomes, D.A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S.L., Miller, R.B., Swenson, N.G., Wiemann, M.C., and Chave, J. 2009. Global wood density database. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.

Zavala-Cruz, J., Jiménez-Ramírez, R., Palma-López, D. J., Bautista-Zúñiga, F., & Gavi Reyes, F. 2016. Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3 (8), 161-171.

México.

Autónoma de Tabasco.

CAPÍTULO 3

EL CARBONO DE LA ESTRUCTURA EDÁFICA EN EL SISTEMA AGROFORESTAL DE CACAO EN TABASCO MÉXICO.

Sánchez-Hernández Rufo¹; **Salvador-Morales Pedro**^{4,2}, Francisco-Santiago S.P.¹; Valdés-Velarde E.³; López-Noverola Ulises¹, Cámara-Cabrales Luisa⁴; Gallardo-Lancho J.F.⁵

¹División Académica de Ciencias Agropecuarias, UJAT, Carretera Villahermosa-Teapa Km. 25 R/A La huasteca Segunda Sección Villahermosa, Tabasco, C.P. 86280;

²Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca (ITZO), Prol. Ignacio Zaragoza s/n, Villa Ocuiltzapotlán, Centro, Tabasco, C.P. 86720;

³Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, CP 56230.

⁴Universidad Juárez Autónoma de Tabasco-División Académica de Ciencias Biológicas, Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya, C.P. 86150.

⁵C.S.I.C., Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca, España.

Autor para correspondencia: rusaher@hotmail.com

Resumen

Se caracterizaron físicamente los suelos cultivados con sistemas agroforestales de cacao (SAFC) en Tabasco, se fraccionó la estructura de dichos suelos para determinar el tamaño y estabilidad de los agregados, así como cuantificar el contenido de carbono, nitrógeno y relación C/N según tamaño de agregado, para determinar los mecanismos de protección de carbono en la estructura. Los SAFC se establecen principalmente en Cambisols, Fluvisols, Gleysols y Vertisols, que presentan texturas francas y bajos contenidos de carbono. Los suelos evaluados concentran la mayor cantidad del carbono a 10 cm de profundidad, además de una relación C/N <10, lo que indica una mayor susceptibilidad de producir flujos de C por la degradación de residuos orgánicos, con respecto al C potencialmente almacenado. Los Cambisols presentaron agregados más pequeños y menos estables, mientras que los Fluvisols y Gleysols presentaron los más grandes y

estables, así como menores densidades aparentes. El contenido de carbono es menor en agregados pequeños, y más alta en agregados grandes, por lo que los Fluvisols almacenan mayor porcentaje de C por presentar agregados más grandes y estables. Se concluye que los SAFC de Tabasco presentan suelos con texturas francas y contenido de arcillas que forman macroagregados grandes y estables que protegen el carbono y reducen la densidad aparente, sin embargo la baja relación C/N explica los bajos contenidos de C edáfico, que confirma la fragilidad de estos suelos que impone un adecuado manejo y conservación.

Palabras clave: Agregados del suelo, Estabilidad de agregados, Suelos arcillosos, propiedades físicas del suelo.

Abstract

The soils cultivated with cocoa agroforestry systems (SAFC) were physically characterized in Tabasco, the structure of these soils was divided to determine the size and stability of the aggregates, as well as to quantify the content of carbon, nitrogen and C / N ratio according to size of aggregate, to determine the mechanisms of carbon protection in the structure. The SAFCs are mainly established in Cambisols, Fluvisols, Gleysols and Vertisols, which have frank textures and low carbon contents. The evaluated soils concentrate the greatest amount of carbon at 10 cm depth, in addition to a C / N ratio of <10, which indicates a greater susceptibility to produce C flows due to the degradation of organic residues, with respect to the C potentially stored. The Cambisols had smaller and less stable aggregates, while the Fluvisols and Gleysols had the largest and stable ones, as well as the lowest apparent densities. The carbon content is lower in small aggregates, and higher in large aggregates, so the Fluvisols store a higher percentage of C for presenting larger and more stable aggregates. It is concluded that the SAFC of Tabasco present soils with frank textures and clay content that form large and stable macroaggregates that protect the carbon and reduce the apparent density, however the low C / N ratio explains the low contents of C edaphic, which confirms the fragility of these soils that imposes an adequate management and conservation.

Key words: Soils aggregates, Aggregates stability, Clayey soils, Physical properties Soil.

Introducción

El suelo es el principal almacén de Carbono (C) con respecto a los ecosistemas terrestres, en el cual se puede llegar a proteger alrededor del 75 % del C que se encuentra en la parte continental del planeta (Lal, 2007). Se estima que en este reservorio, el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), llega a superar en dos ó tres veces los depósitos de carbono (C) de la biomasa aérea (Etchevers *et al.*, 2001). No obstante, para que la fijación y almacenamiento del C ocurra dentro del suelo, es necesario evitar la perturbación de la capa arable, por lo que el Sistema Agroforestal de Cacao (SAFC) cumple esa condición durante varias décadas, lo que hacen de este sistema, un almacén potencial de C. Según Cassano *et al.* (2009), los SAFC se han convertido en un sistema estratégico que permite conciliar los intereses de la producción agrícola, con la conservación de los recursos naturales en los trópicos, llegando a almacenar cantidades de C, inclusive superiores a la de algunos bosques naturales (Schroth *et al.* 2015). Los mecanismos de fijación del COS son diversos, incluyen la protección química mediante las interacciones inter moleculares entre las fracciones de la materia orgánica del suelo (MOS) y las fracciones inorgánicas (Lützow *et al.*, 2006); así como la protección física del C dentro de las estructuras del suelo (Six *et al.*, 2004). Diversas investigaciones han documentado que el tiempo de residencia del C dentro del suelo depende del tamaño y estabilidad de los agregados que caracterizan su estructura, por ejemplo en sistemas donde la perturbación de la capa arable del suelo se reduce, la formación de macroagregados baja, y se incrementa la formación de microagregados estables, en los cuales el C es estabilizado y secuestrado a largo plazo, sin embargo este proceso no se puede generalizar, ya que es variable dependiendo del grupo y las características del suelo (Six *et al.* 2000). Los SAFC adquieren gran importancia como estrategia para desacelerar el cambio climático global, ya que mantienen una capa arable sin perturbación física durante varias décadas, condición esencial para el manejo de los sumideros de C en el suelo. Según Nath y Lal (2017), la estabilidad y tamaño de los agregados son determinantes en la magnitud y duración de los almacenes de C en el suelo, por lo que si el C se almacena en macroagregados, la capacidad de almacenamiento del suelo aumenta, mientras que si el C se almacene en microagregados, dicha capacidad se reduce. Otro aspecto a considerar en los procesos de estabilidad de la estructura y el almacenamiento del C edáfico es la

cantidad y mineralogía de la fracción arcillosa. Según Maltoni *et al.* (2017), en aquellos sistemas donde se reduce el laboreo superficial del suelo, se registra un incremento tanto del número de macroagregados estables, así como un incremento en el contenido de C, esto se debe a que bajo esta condición se promueve la formación de asociaciones termodinámicamente estables entre COS/ hidróxidos de Fe, que reducen el turnover de los macroagregados, por lo que el almacenamiento del C se mantiene en el largo plazo. Debido al rol importante que tiene el suelo en la captura de C, los objetivos del estudio fueron caracterizar físicamente los suelos, determinar el tamaño y estabilidad de los agregados, así como cuantificar el contenido de carbono, nitrógeno y relación C/N en cada tamaño de agregado, para entender los mecanismos de protección del C en la estructura del suelo del SAFC.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en la región de la Chontalpa Tabasco, que incluye los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Cunduacán y Jalpa de Méndez, que es donde se concentra el 94 % del total de la superficie del SAFC en la entidad. Específicamente en la zona fisiográfica denominada Llanura aluvial costera, que se localiza entre las coordenadas 17°50'0" y 18°15'0" N; 92°45'0" y 94°0'0" W.

En una primera etapa de la investigación, se realizaron recorridos de campo y se geo posicionaron 100 parcelas cultivadas con SAFC. Como base de referencia geográfica se utilizó un mapa de suelos de Tabasco, escala 1:250 000 (Jiménez, 2013). Sobre este mapa se sobrepuso una capa de vegetación mediante el software ArcGis, Versión 9.3. Se ubicaron las coordenadas de los puntos geo posicionados durante la primera etapa; por interpolación se identificó la distribución de los SAFC sobre los diferentes grupos de suelos, en cada uno de ellos se describieron los perfiles característicos de acuerdo a la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) versión 2014 (IUSS, Working Group WRB, 2015), y se seleccionaron cuatro parcelas de edad similar.

En cada parcela se ubicaron 10 puntos de muestreos (PM); en cada PM se colectaron tres series de muestras, la primera serie se tomó a tres profundidades (0-10, 10-20, 20-30 cm), se secaron al aire y a la sombra, se trituraron y se pasaron

por un tamiz de malla de 2 mm, estas muestras se utilizaron para determinar la textura por el método de Bouyoucos (Day, 1965).

La segunda serie de muestras se tomaron a tres profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm), cuidando la preservación de las estructuras durante la colecta, posteriormente fueron secadas a temperatura ambiente, al aire y a la sombra, para posteriormente fraccionarlas mediante un tamizado en seco para separar los agregados según sus tamaños, siguiendo el método de Chepil y Bisal (1943). Con los datos generados a partir del tamizado en seco se determinó el diámetro medio ponderado (DMP) y el índice de estabilidad de agregados en seco (IEAS). De acuerdo con Eynard *et al.* (2004), ambos indicadores pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones 1 y 2:

$$DMP = \left[\frac{\sum_{i=1}^n XiWi}{STW} \right] \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde: DMP = diámetro medio ponderado de los agregados tamizados en seco (mm); Xi = diámetro medio de la fracción de cada tamiz (mm), Wi = peso total de la muestra correspondiente al tamaño de la fracción de cada tamiz y STW = peso total de la muestra.

$$IEAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n AW > 1 \text{ mm}}{STW} \right] \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde: IEAS = Índice de estabilidad de los agregados tamizados en seco; $AW > 1$ mm = Peso total de los agregados > 1mm y STW = peso total de la muestra.

Los agregados de cada fracción fueron triturados, tamizados y procesados para determinar automáticamente el contenido de C mediante combustión seca con equipo TOC de la marca Perkin Elmer. La tercera serie se utilizó para determinar la densidad aparente (ρ_b) por el método del doble cilindro (Blake y Hartge, 1986).

Los datos recabados fueron analizados a través de análisis de varianzas, pruebas de comparación de medias de Tukey y análisis de correlación, a través del paquete estadístico SAS para Windows versión 6.12 (SAS Institute, 1999).

Resultados

El Sistema Agroforestal de Cacao en Tabasco se cultiva en un 94% sobre suelos Fluvisols (FL), Vertisols (VR), Gleysols (GL) y Cambisols (CS), los cuales presentan texturas francas arcillosas, excepto los VR cuya clase textural es arcillo limosa. Todos estos suelos son formados por procesos aluviales, que conllevan una acumulación de partículas finas en la superficie del suelo, que se refleja en una distribución uniforme de las partículas de arena, limo y arcillas en toda la profundidad de 0-30 cm. Con respecto a los suelos evaluados, los VR registraron los contenidos más altos de arcillas y limos, mientras que los CS fueron los suelos con menores contenidos de arcillas y mayores contenidos de arenas (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción de suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco, México.

| Suelos | Arena | Limo | Arcilla | Profundidad (Cm) | Arena | Limo | Arcilla | Clase textural |
|--------|-----------------|--------|---------|---------------------|-----------------|-------|---------|---------------------|
| | ----- (%) ----- | | | | ----- (%) ----- | | | |
| CS | 31±12 a | 35±8 b | 34±6 b | 0-10 | 36±13a | 34±8a | 30±6a | Franco Arcilloso |
| | | | | 10-20 | 28±12a | 36±9a | 36±5a | |
| | | | | 20-30 | 29±12a | 34±9a | 37±6a | |
| FL | 27±7 a | 35±7 b | 38±5 ab | 0-10 | 27±7a | 37±9a | 36±5a | Franco Arcilloso |
| | | | | 10-20 | 27±7a | 35±6a | 38±6a | |
| | | | | 20-30 | 29±9a | 33±8a | 38±6a | |
| GL | 28±7 a | 34±5 b | 38±6 ab | 0-10 | 34±8a | 30±5a | 36±6a | Franco Arcilloso |
| | | | | 10-20 | 25±5a | 36±2a | 39±7a | |
| | | | | 20-30 | 25±5a | 37±5a | 38±6a | |
| VR | 16±9 b | 42±7 a | 42±8 a | 0-10 | 23±10a | 37±7a | 40±10a | Arcillo limoso |
| | | | | 10-20 | 16±5a | 43±8a | 41±5a | |
| | | | | 20-30 | 11±8a | 44±4a | 45±9a | |

Abreviaturas: CS: Cambisols, FL: Fluvisols, GL: Gleysols, VR: Vertisols.

En la tabla 2 se presentan los contenidos de C y N, así como las relaciones C/N. De manera general, estas variables presentaron niveles extremadamente bajos en todos los suelos evaluados, particularmente en los CS se presentaron los más bajos, mientras que los GL presentaron los más altos.

A pesar de que los VR presentan la clase textural más contrastante con respecto a los demás suelos evaluados, presentaron porcentajes de C, N y relación C/N similares a los registrados por los CS. En la profundidad de 0-10 cm se registran

los mayores porcentajes de C, N y relaciones C/N, llegando en algunos casos a duplicar los contenidos registrados en las capas más profundas del suelo.

En todos los casos, se observa que conforme aumenta la profundidad, las variables mencionadas disminuyen gradualmente, como reflejo de esa condición, la variable ρ_b aumentó conforme al aumento de la profundidad en el suelo, excepto en los VR donde dicho gradiente no se observó, sino que en este caso la ρ_b se mantuvo constante a lo largo de toda la capa de 0-30 cm. Se registró un nivel de correlación entre la ρ_b y COS de $r=-0.66$ con una $p<0.001$, mientras que entre la ρ_b y el contenido de arcilla la correlación fue de $r=-0.25$ con una $p=0.086$.

Tabla 2. Descripción de suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco, México.

| Suelos | Carbono | Nitrógeno | C/N | Profundidad (Cm) | Carbono | Nitrógeno | C/N | ρ_b (Mg m ⁻³) |
|--------|-----------------|---------------|---------------|---------------------|-----------------|-------------|------------|-----------------------------------|
| | ----- (%) ----- | | | | ----- (%) ----- | | | |
| CS | 2.7±1.5 c | 0.4±0.2 c | 6.9±1.0 bc | 0-10 | 4.48±0.79b | 0.57±0.07b | 7.75±0.66a | 0.99±0.08b |
| | | | | 10-20 | 2.02±0.14 b | 0.30±0.04 b | 6.63±0.49b | 1.35±0.03a b |
| | | | | 20-30 | 1.29±0.16 c | 0.21±0.04 c | 6.24±0.95b | 1.55±0.07a |
| FL | 3.7±2.0 b | 0.5±0.2 b | 7.1±1.1 b | 0-10 | 5.90±0.94ab | 0.71±0.11ab | 8.23±0.74a | 1.06±0.04a b |
| | | | | 10-20 | 2.98±1.0 a | 0.44±0.17 a | 6.82±0.49b | 1.21±0.07c |
| | | | | 20-30 | 2.19±0.40 b | 0.35±0.06 b | 6.18±0.53b | 1.28±0.04b |
| GL | 5.2±2.6 c | 0.6±0.3 a | 8.4±0.6 a | 0-10 | 7.97±1.57a | 0.87±0.27a | 9.18±0.56a | 1.17±0.04a |
| | | | | 10-20 | 3.39±0.58 a | 0.42±0.11 a | 8.18±0.01a | 1.27±0.07cb |
| | | | | 20-30 | 3.19±0.83 a | 0.42±0.10 a | 7.50±0.14a | 1.29±0.08b |
| VR | 2.9±2.0 b | 0.4±0.3 cb | 6.8±1.3 c | 0-10 | 5.22±1.31b | 0.73±0.11b | 7.08±0.83a | 1.15±0.08a |
| | | | | 10-20 | 1.50±0.57c | 0.22±0.11 c | 6.67±0.97b | 1.41±0.09a |
| | | | | 20-30 | 1.14±0.39 c | 0.18±0.19 c | 6.41±1.64b | 1.52±.10a |

Abreviaturas: CS: Cambisols, FL: Fluvisols, GL: Gleysols, VR: Vertisols.

Por su parte, la estructura de los suelos evaluados se caracteriza por un dominio de macroagregados grandes y estables (Tabla 3).

Tabla 3. Variables descriptivas de la estructura de suelos cultivados con cacao en la región de la Chontalpa Tabasco, México.

| Suelos | DMP (mm) | IEAS (g.g ⁻¹) | Profundidad (Cm) | DMP (mm) | IEAS (g.g ⁻¹) |
|--------|-------------|------------------------------|---------------------|-------------|------------------------------|
| CS | 2.96±0.5 c | 0.71±0.0 b | 0-10 | 3.17±0.3a | 0.73±0.06a |
| | | | 10-20 | 2.77±0.5b | 0.70±0.02b |
| | | | 20-30 | 2.93±0.60a | 0.71±0.05b |
| FL | 3.94±0.7 a | 0.81±0.1 a | 0-10 | 3.66±0.7a | 0.80±0.08a |
| | | | 10-20 | 4.07±0.8a | 0.78±0.04a |
| | | | 20-30 | 4.07±0.71a | 0.84±0.07a |
| GL | 3.31±0.3 bc | 0.78±0.0 a | 0-10 | 3.38±0.4a | 0.78±0.05a |
| | | | 10-20 | 3.15±0.2ab | 0.77±0.04a |
| | | | 20-30 | 3.40±0.27a | 0.78±0.04ab |
| VR | 3.59±0.6 ab | 0.78±0.1 a | 0-10 | 3.33±0.5a | 0.74±0.06a |
| | | | 10-20 | 3.58±0.3ab | 0.79±0.03a |
| | | | 20-30 | 3.85±0.99a | 0.80±0.09ab |

Abreviaturas: CS: Cambisols, FL: Fluvisols, GL: Gleysols, VR: Vertisols.

De acuerdo a los análisis de correlación realizados, la textura juega un papel importante en la agregación del suelo, particularmente las proporciones de arena y arcilla afectan las características tanto del tamaño como de la estabilidad de los agregados. En particular, se presentaron niveles de correlación entre el contenido de arcilla y el IEAS y el DMP, los cuales fueron de $r=0.53$, $p<0.001$ y $r=0.59$, $p<0.001$ respectivamente, mientras que la arena correlaciona con las mismas variables en niveles de $r=-0.30$, $p=0.03$ y $r=-0.35$, $p=0.02$ respectivamente. Esta relación entre la textura y las características de las estructuras del suelo, explican porque los CS por ser los que presentan un mayor contenido de arena, son los que registran los agregados más pequeños y menos estable, en cambio los agregados más grandes y estable se registraron en los suelos FL y VR, que son los que presentan un mayor contenido de arcillas. Se observa un ligero patrón de reducción de tamaño y estabilidad de agregados conforme aumenta la profundidad, aunque dicho gradiente solo es significativo estadísticamente en el caso de los CS.

Como se puede apreciar en la Figura 1, existe una estrecha relación entre la estabilidad de los agregados y sus tamaños, lo que confirma que entre más grandes sean los agregados, su grado de estabilidad aumenta. Se observa que los CS presentan el DMP más bajo, por lo que su tamaño de 2.96 ± 0.5 mm le confiere una alta estabilidad de agregados en niveles de 71 g.g⁻¹.

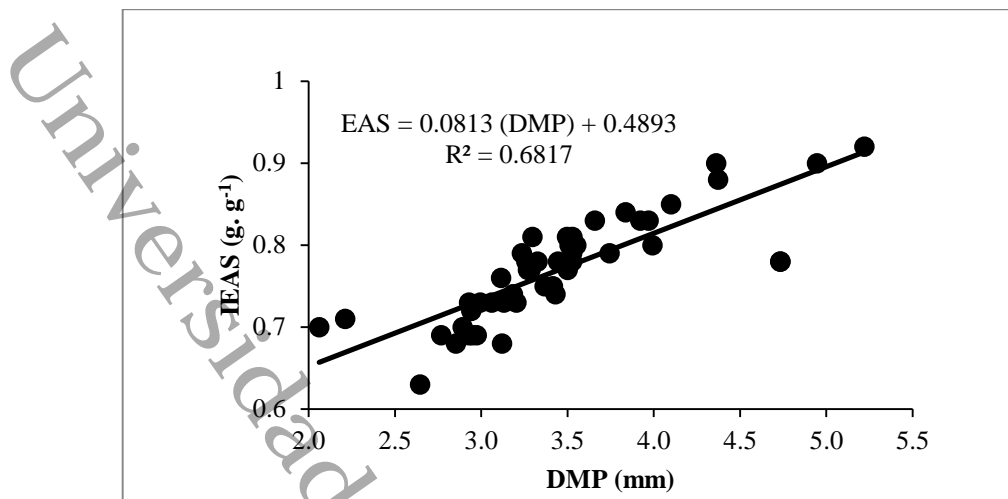


Figura 1. Análisis de regresión lineal entre la EAS con respecto al DMP de los agregados de los suelos.

Los bajos contenidos de C, N y relación C/N que se comentaron con anterioridad, se ven reflejado en las diferentes fracciones de los agregados en las tres profundidades, por lo que de nueva cuenta se observan niveles extremadamente bajos. Las mayores concentraciones de C y N se encuentran en los agregados de tamaño intermedio de entre 0.50-2.0 mm, por lo que son estos los tamaños de agregados que registran las mayores relaciones C/N, mientras que los niveles más bajos se encuentran en los agregados más pequeños de entre 0-0.043 mm (Tabla 4). Se puede observar que los agregados de diferentes tamaños de la capa de 0-10 cm registran un mayor contenido de C, N y relación C/N, llegando inclusive a registrar el doble de la concentración con respecto a las capas de 10-20 y 20-30 cm de profundidad, por lo que solo en la capa de 0-10 cm de profundidad se presentaron diferencias estadísticas significativas. La correlación entre los contenidos de C y N, así como con la relación C/N fue de $r=0.95967$, $p<.0001$ y de $r=0.72828$, $p<.0001$ respectivamente. Se observa que los incrementos en las concentraciones de C afectan negativamente la variable ρ_b , lo que se ve reflejado en una correlación de $r=-0.66068$, $p<.0001$, además que se aprecia una correlación negativa entre los contenidos de limo y C de $r=-0.30505$, $p= 0.0350$.

Tabla 4. Porcentaje de C, N y relación C/N por tamaño de agregados según la profundidad en suelos del sistema agroforestal cacao en Tabasco México.

| Indicador | Profundidad (cm) | Tamaños de agregados (mm) | | | | | | |
|-----------|------------------|---------------------------|------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| | | 0-0.043 | 0.043-0.25 | 0.25-0.50 | 0.50-1.63 | 1.63-2.0 | 2.0-4.76 | > 4.76 |
| C% | 0-10 | 5.3± 1.7a | 5.6±1.7 a | 5.4±1.2 a | 6.4±1.7 a | 6.7±1.5a | 5.8±2.1a | 4.7±1.4a |
| | 10-20 | 2.2±0.9 b | 2.4±0.9 b | 2.4±1.0 b | 2.3±1.1b | 2.5±1.1b | 2.3±0.8 b | 2.7±1.4b |
| | 20-30 | 1.5±0.5 b | 1.8±0.7 b | 1.8±0.6 b | 2.1±0.6 b | 1.9±0.7b | 1.6±0.6 b | 2.1±0.5b |
| N% | 0-10 | 0.7± 0.3a | 0.7±0.2a | 0.7±0.1a | 0.8±0.2a | 0.8±0.2a | 0.7±0.2a | 0.6±0.2 a |
| | 10-20 | 0.3±0.1b | 0.4±0.1b | 0.3±0.1b | 0.3±0.1b | 0.3±0.1b | 0.3±0.1b | 0.4±0.2ab |
| | 20-30 | 0.2±0.1 b | 0.3±0.1b | 0.3±0.1b | 0.3±0.1b | 0.3±0.1b | 0.2±0.1b | 0.3± 0.1b |
| C/N | 0-10 | 7.7±0.9 a | 7.9±1.0 a | 7.9±0.8 a | 8.0±1.0 a | 8.1±1.2 ^a | 8.4±1.4 a | 7.6±0.9 a |
| | 10-20 | 6.9±1.2ab | 6.8±0.9ab | 7.1±1.1ab | 6.8±0.8 b | 7.2±1.1ab | 6.9±0.8 b | 6.7±1.1ab |
| | 20-30 | 6.6±1.2b | 6.5±1.2b | 6.3±1.1b | 6.5±1.3 b | 6.7±1.5b | 6.4±1.0 b | 6.4±1.3 b |

Abreviaturas: TA: Tamaño de agregados

Discusión

La textura del suelo es una propiedad física importante para el buen desarrollo del cultivo de cacao, de acuerdo con Van y Guiller (2017), los mejores rendimientos se obtienen en suelos de textura francas, tales como las que presentan los CS y FL, dichos suelos son considerados como jóvenes que presentan poca o nula horizonación, están moderadamente desarrollados y se forman a partir de sedimentos fluviales o lacustres, que proporcionan buen drenaje interno (IUSS, Working Group WRB, 2015). Las texturas arcillosas pueden contener mejores contenidos de MOS y disponibilidad de nutrientes, sin embargo, la aireación es pobre y el drenaje de agua es lento, por lo que dicha humedad no es fácilmente aprovechada por las plantas, particularmente los VR presentan condiciones alternas de sequía-humedad, que combinadas con los altos contenidos de arcillas de expansión retracción, no permiten un adecuado enraizamiento. Por su parte, los GL son suelos que pueden presentar una textura adecuada, sin embargo, exhiben un manto freático elevado y están altamente regulados por la química del Fe/Al (IUSS, Working Group WRB, 2015). De acuerdo con Bitelly *et al.* (2019), la textura definida por los tamaños de las partículas del suelo, afectan un gran número de variables y procesos del suelo, tales como retención de humedad, conductividad hidráulica, así como propiedades térmicas y geoquímicas. La retención del COS es uno de esos procesos que están condicionados por la textura, en conjunto con la acción de factores como manejo, vegetación y variación climática, por lo que, en algunos ambientes específicos, y bajos ciertos manejos y cultivos, el COS

almacenado está más vinculado al limo, debido a que estas partículas condicionan la retención y disponibilidad de agua para la planta, inclusive de manera más importante que la arcilla y la arena (Augustin y Cihacek, 2016). Por lo tanto, la arcilla y el limo juegan un papel clave en la estabilización del COS, debido a que son fracciones susceptibles de saturarse de C (Matus *et al.*, 2016). Sin embargo, los mecanismos de protección del C en la estructura del suelo son aún más diversos, por una parte, incluyen la protección química mediante las interacciones inter moleculares entre las fracciones de la MOS y las fracciones inorgánicas (Lützow *et al.*, 2006); así como la protección física del C dentro de las estructuras del suelo (Six *et al.*, 2004). Por lo tanto, además de la textura, la agregación del suelo es importante en el proceso de almacenamiento del COS, es por ello que en los suelos VR, a pesar de que registraron 42 % de arcilla, los porcentajes de C registrados fueron bajos con respecto al resto de suelos evaluados. De acuerdo con Sánchez *et al.* (2011), los contenidos de MOS y C son más altos en suelos arcillosos, debido a una mayor protección de la MOS, dicho proceso ocurre cuando la MOS es adsorbida por las arcillas o limos, cuando esta se incrusta o se recubre por las arcillas, o bien cuando la MOS se encuentra fuera del alcance de los microorganismos, por estar dentro de los agregados del suelo. Los resultados de este estudio demuestran que los suelos con altos contenidos de arcillas, presentaron mayores contenidos de C, N y relación C/N, excepto los VR que, a pesar de presentar también una textura arcillosa, registraron bajos niveles de C, N y relación C/N, aunque de manera general todos los suelos evaluados registraron valores exageradamente bajos en esas variables.

Los sistemas agroforestales por su alta diversidad arbórea permiten un aporte de hojarasca que oscila entre 4.98 (Triadiati *et al.*, 2011) hasta 10.9 t ha⁻¹ (Jaimez y Franco, 1999), el cual mejora las condiciones físicas y químicas del suelo a través de su descomposición y transformación a humus (Gallardo, 2017). La mayor cantidad de la materia orgánica en los sistemas agroforestales, es producto de la asociación de cultivos perennes con especies arbóreas, modelo que genera una gran cantidad de biomasa, que se refleja en una mayor cantidad de mantillo, la cual es superior a la que producen los sistemas de monocultivo (Barrezueta-Unda y Paz-González, 2017). Sin embargo, el proceso de acumulación del COS involucra varios factores, entre ellos se incluye la composición química de los residuos. Al respecto

Cools *et al.* (2014) indican que el uso de la relación C/N como indicador de la composición química de la MOS, es demasiado simplista y puede dar lugar a conclusiones erróneas, si no se toma en cuenta explícitamente las especies de los árboles presentes, indican que la relación C/N de la capa superficial del suelo es controlada por las especies de los árboles que se establecen en el sistema, mientras que en las capas más profundas, este indicador es controlado por las propiedades edáficas. Los estudios de Pérez-Flores *et al.* (2017) indican que el aporte de hojarasca en los SAFC varía de acuerdo con la edad de estos, por lo que los sistemas de 35 años producen más de 2 Mg ha⁻¹ de materia seca, mientras que los sistemas de 55 años producen alrededor de 1.5 Mg ha⁻¹, la cual proviene en un alto porcentaje de especies de leguminosas, que sirven como dosel de sombra de los árboles de cacao. Gallardo (2017) indica que los residuos orgánicos provenientes de hojas de leguminosas presentan relaciones C/N que oscilan entre 12-16, lo que predispone una rápida mineralización que generan elevados flujos de C y N, por lo que la acumulación de la MOS en forma de humus es limitada. Barrezueta-Unda y Paz-González (2017) reportaron relaciones C/N de 9, 9 y 12 en suelos Alfisols, Entisols e Inseptisols cultivados con SAFC, asociando a estos niveles, una moderada mineralización y liberación de N en el suelo, así como una excesiva descomposición de la hojarasca. Las exposiciones vertidas por los autores antes mencionados, abonan a la comprensión de la dinámica del ciclo biogeoquímico del C en ambientes tropicales lluviosos, donde por una parte las altas precipitaciones incrementan la producción de la biomasa, acidifican el suelo y producen anaerobiosis que promueven la acumulación de la MOS, sin embargo, cuando la precipitación es estacional y se intercala con las altas temperaturas durante los periodos de sequía, las reacciones que induce la actividad microbiana se aceleran y provocan un rápido agotamiento de la MOS. Cuando los factores climatológicos extremos de altas precipitaciones y temperaturas, se combinan con una baja relación C/N de los residuos orgánicos aportados por el SAFC al suelo, se induce un rápido agotamiento de la hojarasca, por lo que, aunque sean elevados dichos aportes, estos producen elevadas tasas de flujos C más que la acumulación de humus, lo que explica las relaciones C/N exageradamente bajas que no rebasan el nivel de 8.5 en ninguno de los suelos evaluados, lo que indica que la MOS existente es prácticamente microbiología (biomasa microbiana) (Gallardo, 2017).

Si se toma en cuenta que los dos componentes más abundantes de la MOS son el C y N, el incremento de ambos elementos al aumentar la acumulación de la MOS, juega un rol importante en la reducción de la ρ_b , lo que explica las correlaciones inversas observadas entre la ρ_b y las variables C, N y relación C/N, así como también la disminución gradual de la ρ_b conforme aumenta la profundidad. Asimismo, si se considera que la relación C/N es un indicador del grado de persistencia de la MOS, las bajas relaciones C/N indican que el agotamiento rápido de las reservas orgánicas trae consigo la pérdida de la estructura, lo que a su vez incrementa la ρ_b , por lo que la temporalidad de la conservación de la MOS es importante en la duración del efecto sobre la disminución de la ρ_b . Muchas investigaciones han señalado que el COS es la variable más importante en la predicción de la ρ_b , seguido de las especies de árboles presentes, contenido de gravas, material parental, profundidad, contenido de limo, pH, contenido de arcilla y suma de cationes intercambiables (Jalabert *et al.*, 2010). Sin embargo, esa importancia depende también de la profundidad, ya que el COS como predictor de la ρ_b es más importante que el contenido de arcilla solo en la profundidad de 0-30, mientras que a una profundidad mayor, el contenido de arcilla adquiere mayor relevancia como predictor de esa variable, por encima del contenido de COS (Benites *et al.*, 2007), aunque la presente investigación exploró la variable ρ_b solo a una profundidad de 0-30 cm, los resultados aquí obtenidos coinciden con los de las investigaciones antes citadas, ya que en todos los suelos evaluados se observó que la ρ_b aumentó al reducirse el porcentaje del COS conforme aumentó la profundidad, independientemente que la distribución del contenido de arcilla en esos suelos, fue mayor a mayores profundidades.

La intensidad de los procesos de mineralización y agotamiento de la MOS en los SAFC bajo el ambiente del trópico húmedo, realzan la importancia que tiene el contenido de arcillas en la estabilización de la estructura, por un lado, promueven estructuras estables o envuelven la MOS y la protegen de la actividad microbiana, por lo que los suelos arcillosos tienden a acumular más C, siempre y cuando haya MOS. Como se pudo observar, los suelos más arcillosos como los VR, FL y GL registraron agregados más grandes y estables en toda la profundidad de 0-30 cm, excepto en el suelo CS donde el tamaño y estabilidad de los agregados fue mayor en la profundidad 0-10 cm, estos resultados revelan la mayor importancia que tiene

el contenido de arcilla en la estabilización de la estructura edáfica, con respecto al papel que juega la MOS. El efecto que provoca la interacción de la arcilla con el componente orgánico del suelo es de suma importancia ante la necesidad de estabilizar el COS, sin embargo, podemos observar que la conservación del COS no depende directamente de la cantidad de arcilla, sino que obedece a las condiciones de arreglo estructural que se adquiere, considerando que los factores que intervienen en la agregación van más allá del contenido de arcillas, un caso específico que sugiere este fenómeno se observa en los suelos VR, que a pesar de presentar un alto contenido de arcilla y de presentar un elevado tamaño y estabilidad de los agregados, el contenido de COS es bajo con respecto a los suelos FL y GL, en niveles similares a suelos con menores contenidos de arcilla como los CM. Los efectos indirectos del contenido de arcilla en la estabilización de la MOS se deben a que influyen en la composición de las comunidades microbianas y condiciona la estructura del suelo, por lo que también afectan el drenaje interno del suelo, tanto de agua como de aire (Andrews *et al.* 2011; Fierer y Schimel 2002). De acuerdo con Sposito *et al.* (1999), el tamaño pequeño de las arcillas le confiere una alta superficie específica, sin embargo, entre los diferentes tipos de arcillas hay variaciones entre la carga estructural, ya sea permanente o variable dependiente del pH que a su vez es controlada por la mineralogía de las arcillas. La estabilización de la MOS en función del contenido de arcilla, no es un fenómeno que se pueda generalizar, por ello Rasmussen *et al.* (2018) indican que es necesario urgentemente modificar los modelos biogeoquímicos para mejorar la comprensión del papel que juegan las propiedades fisicoquímicas del suelo en el ciclo de las MOS, argumentan que en suelos alcalinos con contenidos limitados de humedad, el calcio intercambiable es un predictor muy potente del contenido de MOS, mientras que en suelos con mayor contenido de humedad y bajo ciertas condiciones de acidez, los oxihidróxidos de Fe y Al surgen como los mejores predictores, inclusive por encima de los contenidos de arcillas. Otros aspectos importantes que se deben de tomar en cuenta en la estabilización del COS, son la composición química de la MOS y el tamaño de la fracción de la estructura donde este componente se protege, ya que los tamaños de los agregados influyen en su nivel de estabilidad, lo que se puede apreciar a través de los resultados obtenidos en la presente investigación (Figura 1). Al respecto Martínez-Trinidad *et al.* (2008) indican que el tamaño y estabilidad de los agregados está vinculado a la

composición química de la fuente orgánica, entre mayor es la cantidad del COS lábil, el tamaño de los agregados aumenta, mientras que los agregados de menor tamaño se asocian a la fracción altamente humificada. Por lo tanto, la estabilidad que se presenta en los macroagregados de tamaño entre 0.5-2.0 mm en la presente investigación, puede ser temporal en la medida de que el COS contenido en esas fracciones sea mineralizado, debido a la naturaleza lábil de los residuos, así como por su cercanía a la superficie del suelo, donde la riqueza orgánica y el medio ambiente generan una gran explosión microbiológica. Por su parte, Bronick y Lal (2005) afirman que la fuente de los residuos influye en la composición y concentración del COS en el suelo, así como en la agregación a través de asociaciones orgánicas-minerales. En este sentido, Sánchez-Hernández *et al.* (2006) señalan que el aporte de residuos frescos a suelos arcillosos como los VR, incrementan tanto el DMP como la estabilidad de agregados tamizados en seco. Sin embargo, dicha estabilidad puede ser temporal en la medida de que la fuente orgánica que mantiene los complejos orgánicos-minerales se agoten debido a su naturaleza química, Al respecto, Fontaine *et al.* (2007) respaldan una hipótesis de que el suministro de residuos orgánicos frescos provenientes de la vegetación, estimulan la mineralización microbiana del C, por lo que la ausencia del COS fresco, permite la estabilidad de COS en capas más profundas, debido a la falta de la fuente esencial de energía para los microbios del suelo. Dicha hipótesis coincide con los resultados obtenidos en esta investigación, lo que explica por qué casi el 50 % del total del COS se concentra en los primeros 10 cm de profundidad, mientras que, en las profundidades mayores a 10 cm, el porcentaje de COS se abate drásticamente. Estudios realizados por Gama-Rodríguez *et al.* (2010) en SAFC indican que la distribución del C en los macroagregados se reduce conforme aumenta la profundidad, mientras que en los microagregados no se observa dicha variación, señalan además que el 70 % del COS se concentra en los macroagregados, mientras que el 30 % restante se protege en los microagregados, lo que provoca una favorable reducción de la ρ_b . A diferencia de la investigación antes referida, los resultados de esta investigación presentan un gradiente de disminución en la concentración de C, N y relación C/N conforme aumenta la profundidad, indistintamente si son microagregados o macroagregados, e independientemente del grupo de suelo, confirmando que en los macroagregados estables cercanos a la superficie se estabiliza la mayor cantidad de COS. Resultados similares fueron

reportados por Salvador *et al.* (2017), quienes indican que el contenido de COS es mayor en los primeros 10 cm de la superficie del suelo, mientras que en las profundidades mayores la concentración disminuye significativamente, Monroe *et al.* (2016) reportaron resultados similares en sistemas de pastizales, bosques naturales y SAFC, señalando que en una profundidad de 0-100 cm, entre el 31-41 % del COS se concentra en los primeros 20 cm.

Conclusiones

La fracción arcillosa de suelos cultivados con SAFC en condiciones del trópico húmedo, juega un rol importante en la agregación del suelo, por lo que la textura es la propiedad edáfica más relevante en la estabilización de la estructura y la protección física de la MOS, al permitir la formación de agregados más grandes y estables, sin embargo, los contenidos extremadamente bajos de C, N y relaciones C/N de los suelos, indican que este proceso de protección es rápido y temporal, por lo que el efecto es notorio principalmente en la profundidad de 10 cm, donde además de registrarse una reducción de la ρ_b , hay una concentración de C, de casi el doble del total que se encuentra en la profundidad de 10-30 cm. El mayor porcentaje de C se protege en macroagregados de tamaño de 0.5-2 mm, y aunque los índices IEAS y DMP son altos, se advierte que el suministro de residuos frescos al suelo, es más susceptible de generar flujos de C que su conservación mediante la formación de humus. Se sugiere realizar estudios para evaluar la composición química de los residuos orgánicos frescos que ingresan al suelo, así como la influencia del clima en la velocidad de la descomposición, para definir estrategias que incrementen la permanencia de C en forma de humus en el SAFC.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews DM, Lin H, Zhu Q, Jin LX, Brantley SL (2011) Hot spots and hot moments of dissolved organic carbon export and soil organic carbon storage in the shale hills catchment. *Vadose Zone Journal* 10(3):943–954. DOI: <https://dx.doi.org/10.2136/vzj2010.0149>
- Augustin, C., & Cihacek, L. J. (2016). Relationships between soil carbon and soil texture in the northern great plains. *Soil science*, 181(8), 386-392. DOI: <https://dx.doi.org/10.1097/SS.0000000000000173>
- Barrezueta-Unda, Salomón, and Antonio Paz-González. 2017. Caracterización de la sostenibilidad en función de aspectos socioeconómicos del sistema agrario cacao en la provincia de el Oro, Ecuador. *Revista Científica Agroecosistemas* 5 (1): 6–16.
- Benites, V. M., Machado, P. L., Fidalgo, E. C., Coelho, M. R., & Madari, B. E. (2007). Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139(1-2), 90-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.005>
- Bittelli, M., Andrenelli, M. C., Simonetti, G., Pellegrini, S., Artioli, G., Piccoli, I., & Morari, F. (2019). Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils?. *Soil and Tillage Research*, 185, 36-46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.018>
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. In: A. Klute (Ed.). *Methods of soil analysis, Part I. Physical and mineralogical methods*, 2nd ed. American Society of Agronomy and SSSA. Agronomy Monograph. Madison, Wisconsin, USA, n° 9, 363-375 pp.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Cassano, C. R., G. Schroth, D. Faria, J. H. Delabie, L. Bede. 2009. Landscape and farm scale management to enhance biodiversity conservation in the cocoa producing region of southern Bahia, Brazil. *Biodiversity and Conservation* 18(3): 577-603. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9526-x>
- Chepil, W. S., & Bisal, F. (1943). A rotary sieve method for determining the size distribution of soil clods. *Soil Science*, 56(2), 95-100.

- Cools, N., Vesterdal, L., De Vos, B., Vanguelova, E., & Hansen, K. (2014). Tree species is the major factor explaining C: N ratios in European forest soils. *Forest Ecology and Management*, 311, 3-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.047>
- Day, P. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. p. 565-566 Part 1. In Black, C.A. (Ed.). *Method of soil analysis*. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.
- Etchevers B., J. D., M. Acosta M., C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 19 p.
- Eynard, A., Schumacher, T. E., Lindstrom, M. J., & Malo, D. D. (2004). Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1360-1365. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1360>
- Fierer N, Schimel JP (2002) Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biol Biochem* 34(6):777–787. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00007-X)
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450(7167), 277. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- Gallardo L. J.F. 2017. *La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compost y captura de carbono*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco de Mora, Estado de México. 389 p.
- Gama-Rodríguez, E. F., Nair, P. R., Nair, V. D., Gama-Rodríguez, A. C., Baligar, V. C., Machado, R. C. 2010. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental management*, 45(2): 274-283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9420-7>
- IUSS Working Group WRB, 2015. *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos*. Roma, Italia. 106 p.
- Jaimez, R. E., & Franco, W. (1999). Producción de hojarasca, aporte en nutrientes y descomposición en sistemas agroforestales de cacao y frutales. *Agrotrópica*, 11(1), 1-8.

- Jalabert, S. S. M., Martin, M. P., Renaud, J. P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., & Arrouays, D. (2010). Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. *Soil Use and Management*, 26(4), 516-528. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00305.x>
- Jiménez Ramírez, R. 2013. Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. M.SC. Thesis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas Tabasco, México. 158 p.
- Lal, R. 2007. World soils and global issues. *Soils Tillage Res.* 97: 1–4.
- Lützw, M. V., Kögel Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European Journal of Soil Science* 57 (4): 426-445. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
- Maltoni, K. L., De Mello, L. M. M., & Dubbin, W. E. (2017). The effect of Ferralsol mineralogy on the distribution of organic C across aggregate size fractions under native vegetation and no-tillage agriculture. *Soil Use and Management*, 33(2), 328-338. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12339>
- Martínez-Trinidad, S., Cotler, H., Etchevers-Barra, J. D., Ordaz-Chaparro, V. M., & León-González, F. D. (2008). Efecto del manejo en la agregación del suelo en un ecosistema tropical seco. *Terra Latinoamericana*, 26(4), 299-307.
- Monroe, P. H. M., Gama-Rodrigues, E. F., Gama-Rodrigues, A. C., & Marques, J. R. B. (2016). Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 99-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>
- Nath, A. J., & Rattan, L. A. L. (2017). Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the north Appalachian region, USA. *Pedosphere*, 27(1), 172-176. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60301-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60301-1)
- Pérez-Flores, J., Pérez, A. A., Suárez, Y. P., Bolaina, V. C., & Quiroga, A. L. (2018). Leaf litter and its nutrient contribution in the cacao agroforestry system. *Agroforestry Systems*, 92(2), 365-374. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0096-3>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W. R., Keiluweit, M., Lawrence, C. R., Berhe, A. A., ... & Marin-Spiotta, E. (2018). Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content. *Biogeochemistry*, 137(3), 297-306. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>

- Morales, P. S., Sánchez Hernández, R., Sánchez Gómez, D., López Noverola, U., Santiago, G. A., Valdés Velarde, E., & Gallardo Lancho, J. F. (2017). Evolution of soil organic carbon during a chronosequence of transformation from cacao (*Theobroma cacao* L.) plantation to grassland. *Acta Agronómica*, 66(4), 525-530. DOI: <https://dx.doi.org/10.15446/acag.v66n4.62543>
- Sánchez-Hernández, R., Ramos-Reyes, R., Geissen, V., Mendoza-Palacios, J. D. D., Cruz-Lázaro, E. D. L., Salcedo-Pérez, E., & Palma-López, D. J. (2011). Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico Mexicano. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 211-219.
- Sánchez-Hernández, R., V. M. Ordaz-Chaparro, G. S. Benedicto-Valdés, C. I. Hidalgo-Moreno y D. J. Palma-López. 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Univ. Ciencia* 22: 13-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.19136/era.a22n1.323>
- SAS Institute. 1999. SAS/STAT. Guide for personal computer. Ver. 6.12. Cary, NC, USA. 889 p.
- Schroth G., L.C. Bede, A.O. Paiva, C.R. Cassano, A.M. Amorim, D.Faria, E. Mariano-Neto, A. M. Z. Martini, R. H. R. Sambuichi, R. N. Lôbo. 2015. Contribution of agroforests to landscape carbon storage. *Mitigation and adaptation Strategies for Global Change* 20:1175-1190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9530-7>
- Six, J. A. E. T., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099-2103. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- Six J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Deneff, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics, *Review. Soil & Tillage Research* 79:7-31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sposito, G., Skipper, N. T., Sutton, R., Park, S. H., Soper, A. K., & Greathouse, J. A. (1999). Surface geochemistry of the clay minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7), 3358-3364. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3358>
- Triadiati, S., Tjitrosemito, E., Guhardja, E., Sudarsono, H., Qayim, I., & Leuschner, C. (2011). Litterfall production and leaf-litter decomposition at natural forest and cacao agroforestry in Central Sulawesi, Indonesia. *Asian Journal of biological sciences*, 4(3), 221-234. DOI: <http://dx.doi.org/10.3923/ajbs.2011.221.234>

Van Vliet, J. A., & Giller, K. E. (2017). Mineral nutrition of cocoa: a review. In *Advances in Agronomy* (Vol. 141, pp. 185-270). Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.017>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Palmira, junio 16 de 2017

CERTIFICA QUE

El Dr. Investigador **RUFO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ** junto con su equipo de coautores, cuentan con la aprobación de su trabajo titulado: "**Evolution of Soil Organic Carbon during a Cronosequence of Transformation from Cacao Plantation to Grassland**" el cual se encuentra en etapa de edición editorial y agendado para salir publicado en la próxima edición de Acta Agronómica: v66n4-2017, en el área de **Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos**".

La Revista Acta Agronómica, actualmente se encuentra indexada en Web of Science, Scopus, Ebsco, entre otros, y ante el índice Bibliográfico Nacional de Publindex-Colciencias en categoría A2.

Atentamente,



CREUCI MARIA CAETANO
Editora Jefe
Revista Acta Agronómica

CAPÍTULO 4

EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN UNA CRONOSECUENCIA DE REEMPLAZO DE CACAOTAL A PASTIZAL

Evolution of Soil Organic Carbon during a Cronosequence of Transformation from Cacao Plantation to Grassland

Pedro Salvador Morales^{1,6}, Rufo Sánchez Hernández^{2§}, Delfino Sánchez Gómez¹, Ulises López Noverola², Gelacio Alejo Santiago³, Eduardo Valdés Velarde⁴ y Juan Fernando Gallardo Lancho⁶.

¹ Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca (ITZO, México); ²División Académica de Ciencias Agropecuarias, UJAT, Carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/A. La Huasteca, Segunda Sección Villahermosa, Tabasco 86280 (México); ³Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit (México); ⁴Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco (México); ⁵C.S.I.C., Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (España); ⁶División Académica de Ciencias Biológicas, UJAT;

§Autor para correspondencia: <rusaher@hotmail.com>.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto del cambio de uso de suelo del Sistema Agroforestal de Cacao (SAFC) sobre los niveles de Carbono Orgánico del Suelo (COS) y otras propiedades indicadoras de la fertilidad edáfica (densidad aparente pb, capacidad de intercambio catiónico CIC, N total del suelo NTS), cuando se produce un cambio de uso de suelo de SAFC a pastizal (PZ). Para ello, se seleccionaron sitios donde se registró este cambio de uso del suelo, considerando diferentes intervalos de tiempo (1-5, 6-10 y 11-20 años). Como referencia se consideró un SAFC de 20-35 años. Adicionalmente, se tomaron muestras de suelo a -30 cm de profundidad para determinar los contenidos de COS, NTS, CIC, pb, materia orgánica del suelo (MOS) y la relación C/N edáfica. Consecuentemente, se evaluó la resistencia a la penetración del suelo in situ. Los

resultados indicaron que el cambio de uso de suelo SAFC a PZ, no ocasionó una disminución significativa de la cantidad de COS almacenado (0-30 cm) durante el tiempo considerado respecto al SAFC. Sin embargo, si sólo se muestrean los -10 cm primeros del suelo, se observa una significativa compactación edáfica, junto con una caída del valor de la CIC a largo plazo (20 años).

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, densidad aparente edáfica, fertilidad del suelo, materia orgánica del suelo, relación C/N edáfica.

Abstract

The aim of this research was to evaluate the impact of the soil use change of the Cocoa Agroforestry System (CAS) on soil organic carbon (SOC) levels and other indicating soil chemical fertility properties (edaphic density ρ_b , cation exchange capacity CEC, soil total nitrogen STN), when a soil use change occurs from CAS to grassland (GL). For this, in order to be selected was recorded, considering different time intervals (1-5, 6-10 y 11-20 years). However, a CAS of 20-35 years was considered as a reference. In addition, soil samples were taken at -30 cm depth to determine the contents of SOC, STN, CEC, ρ_b , soil organic matter (SOM) and the soil C/N ratio. Consequently, the soil penetration resistance was evaluated in situ. The results indicated the change in soil use from CAS to GL, did not cause a significant decrease in the amount of stored SOC (0-30 cm) during the considered time with respect to CAS. However, if only the first -10 cm of soil is sampled, a significant soil compaction is observed throughout a decrease in the CEC value in the long term (20 years).

Key words: Soil use change, edaphic apparent density, soil fertility, soil organic matter, edaphic C/N relationship.

Introducción

Los sistemas agroforestales (SAF) son formas de uso de la tierra que han demostrado conservar los recursos naturales en los trópicos desde hace miles de años y, por ello, se han promovido a gran escala desde la segunda mitad del Siglo pasado como un avance hacia una agricultura sostenible (Nair, 1987). El sistema agroforestal de cacao (SAFC) es uno de los más importantes que se distribuyen en los Estados de Tabasco y Chiapas (Sur de México); pero en tiempos recientes este sistema se enfrenta a problemas fitosanitarios, sumado a bajos rendimientos por un manejo inadecuado (Bautista-Mora *et al.* 2016); como consecuencia de ello se están talando plantaciones en favor de otros cultivos (Díaz-José *et al.* 2013). Según Don *et al.* (2011) el cambio de uso de suelo es la segunda fuente de variación más importante que el hombre ha provocado para inducir emisiones de CO₂. En particular, la deforestación en los trópicos y subtrópicos provoca pérdidas de biomasa y de carbono orgánico del suelo (COS). El cambio de uso de suelo puede afectar los niveles del COS debido a la variación de la producción que llega al suelo y por la aceleración en la velocidad de descomposición de los residuos orgánicos (RROO); por tanto, algunos factores como el manejo del cultivo, la especie que se incorpore, así como las características de los RROO, afectan la capacidad de almacenamiento de COS (Jandl *et al.* 2007). Según Schroth *et al.* (2015) los SAFC pueden llegar a acumular una importante cantidad de biomasa arbórea (lo que significa almacenar altas cantidades de carbono, a veces incluso superiores a la de algunos bosques naturales).

Otros aspectos importantes que se ven modificados por la reducción del contenido de materia orgánica del suelo (MOS) son los contenidos de nitrógeno total del suelo (NTS) y las formas asimilables de nutrientes. Bajo condiciones del trópico húmedo el tamaño de los almacenes de MOS es pequeño y se mineraliza rápidamente, por lo que la fertilidad del suelo puede disminuir, haciendo al agroecosistema altamente dependiente del suministro de fertilizantes. De acuerdo con Yoneyama *et al.* (2015), para que el suministro de nutrientes a las plantas superiores se requiere abundancia de RROO, ya que son fuentes de MOS tras el proceso de humificación, en el que interviene la actividad microbiana (tras la trituración propiciada por la mesofauna), siendo responsables de la liberación de nutrientes que pueden ser absorbidos por las raíces, coadyuvado por las hifas de los hongos micorrízicos. En

Tabasco la mayor superficie del SAFC se distribuye en la región de la Chontalpa, zona en la que recientemente el sistema pastizal ha registrado un importante incremento en su superficie (Ramos *et al.* 2016). Sin embargo, no han sido suficientemente estudiadas las modificaciones en las propiedades físicas, fisicoquímicas y bioquímicas (en particular, de los almacenes del COS) que se están provocando por este cambio de uso de suelo.

Por todo lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la modificación de los niveles de COS y otras variables edáficas (densidad aparente, resistencia a la penetración, capacidad total de intercambio catiónico, NTS y relación C/N edáfica), indicadoras de la fertilidad edáfica, en una cronosecuencia de pastizales establecidos tras la tala de plantaciones de cacao. La hipótesis de trabajo es que el cambio del uso del suelo afecta la fertilidad del suelo, modificando los niveles de COS.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en los ejidos Iquinuapa, Hermenegildo Galeana y Soyataco pertenecientes al Municipio de Jalpa de Méndez (Tabasco, México); tales comunidades se ubican en las coordenadas geográficas 10° 33' N y 93° 45' W (Fig. 1).

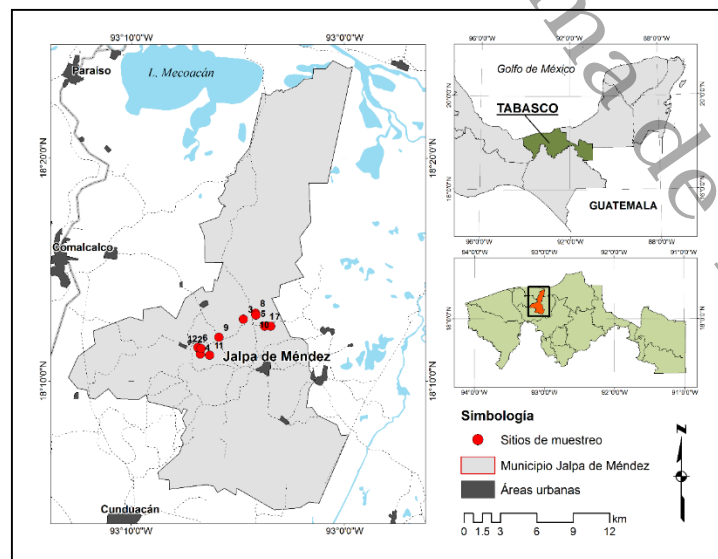


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en comunidades de Jalpa de Méndez (Tabasco, México).

Condiciones climáticas

El clima corresponde a cálido húmedo, con abundantes lluvias en verano; la temperatura media anual oscila entre 24 y 28°C; y la precipitación media anual entre 1500 y 3000 mm año⁻¹ (INEGI, 2006).

Componentes geológicos

Los materiales geológicos dominantes son sedimentos profundos que fueron acarreados por numerosos ríos y arroyos que surcan la zona a partir del intemperismo de las rocas de la Sierra y de la erosión de los suelos de los lomeríos, principalmente durante el Cuaternario reciente; estos materiales, compuestos por mezclas de diferentes minerales, fueron finalmente depositados por las continuas avenidas, constituyendo hoy grandes extensiones de tierra (Palma *et al.* 2007).

Tipos de suelo

Los suelos se formaron a partir de tales sedimentos Cuaternarios, por lo que son suelos jóvenes, en todo caso Holocenos (Palma *et al.* 2007). De acuerdo con el mapa de suelos (Jiménez *et al.* 2013) dominan los Gleysoles.

Vegetación

Según Palma *et al.* (2007) la vegetación nativa de esta zona, corresponde con una selva mediana perennifolia. Sin embargo, esta vegetación ha sido sustituida por pastizales nativos y mejorados; aún se conservan SAFC, los cuales poseen una gran diversidad de flora, destacando aproximadamente 28 familias, 58 géneros y 67 especies (Sánchez-Gutiérrez, 2012) y siendo las más importantes *Erythrina americana*, *E. poeppigiana*, *Gliricidia sepium* (Fabaceae), *Cedrela odorata* (Meliaceae) y *Colubrina arborescens* (Rhamnaceae).

Muestreo de suelo

Se seleccionaron sitios que anteriormente fueron SAFC por lo que sufrieron un cambio de uso de suelo. Para elegir los sitios de muestreo en una primera etapa se realizó una encuesta a los productores con el propósito de conocer el historial de manejo de sus cultivos, en particular el número de años desde que se realizó el cambio de uso. A partir de los resultados de la encuesta se determinó que el principal cambio de uso de suelo fue de SAFC a pastizales (PZ). Los años de

cambio que fueron reportados por los agricultores se organizaron en una base de datos, estableciéndose los siguientes rangos: 1-5 años (PZ5), 6-10 años (PZ10) y de 11-20 años (PZ20). Cada rango de tiempo se consideró como tratamiento, disponiéndose cuatro parcelas (repeticiones) por tratamiento. Como tratamiento de referencia (control) se muestrearon parcelas de SAFC de 20-35 años de establecimiento (SAFC35); cada parcela fue considerada como una unidad experimental.

Determinación de las propiedades físicas edáficas

Una primera segunda serie de muestras se tomaron con un cilindro de volumen conocido para la determinación de la densidad aparente edáfica (Blake y Hartge, 1986). En cada unidad experimental se ubicaron 10 sitios de muestreos; en cada sitio de muestreo se tomaron muestras a tres profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 105 °C hasta peso constante; el peso seco de la muestra fue relacionado con el volumen del cilindro para la determinación de la densidad aparente (ρ_b).

Se tomaron mediciones de resistencia a la penetración *in situ* con un penetrómetro *Bush SP1000 ELE* provisto de un captor de fuerza y otro de desplazamiento; se utilizó un cono estándar (ASAE, 30°) con un diámetro en la base de 1,28 cm (Bradford, 1986); la velocidad aproximada de inserción fue de 5,0 cm s⁻¹; la resistencia a la penetración se expresó en MPa.

Determinación de las propiedades bioquímicas edáficas

Otra segunda etapa del trabajo entonces consistió en la recolección de dos series de muestras de suelos. La primera serie consistió en la obtención de muestras compuestas (a partir de 10 submuestras por cada unidad experimental) tomadas a -30 cm de profundidad. Dichas muestras se secaron a la sombra, se trituraron en charolas de plástico y luego se tamizaron para obtener un tamaño de partícula inferior a 2,0 mm.

A estas muestras se les determinó el COS por el método del dicromato según Walkley y Black, el NTS por el método semimicro Kjeldahl y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de extracción con acetato de amonio y

posterior cuantificación por absorción atómica. El porcentaje de MOS se calculó utilizando el factor 1,72 a partir del valor del COS. El valor de la ρ_b se utilizó para transformar los resultados del COS obtenidos como mg C g^{-1} a valores de Mg C ha^{-1} . Los métodos bioquímicos edáficos antes mencionados se detallan en Chapman y Pratt (1997) y se corresponden con la NOM-021-RECNAT (2000).

Análisis de datos

Los datos recabados fueron analizados usando el paquete estadístico Statistical Analysis Systems (SAS, 2002) para Windows, versión 6.12 ®. Para detectar diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos se realizó un análisis de varianza ($p < 0.05$) y pruebas de comparación de medias de Tukey.

Resultados

Propiedades físicas del suelo.

En la variable densidad aparente (ρ_b) se observaron diferencias estadísticas tanto para el factor tratamiento, como para el factor profundidad (Cuadro 1). En la capa superficial (0-10 cm) el tratamiento PZ20 presentó el valor más alto significativamente de ρ_b , siendo de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$ (Cuadro 1); el menor valor, junto con PZ5 y PZ10 iguales estadísticamente, lo obtuvo SAF35 ($1,00 \text{ Mg m}^{-3}$).

También puede observarse en el Cuadro 1 que, de manera general, a medida que se incrementa la profundidad del muestreo del suelo también lo hace el valor de la ρ_b en todos los tratamientos; ello se debe a que en la primera capa superficial (0-10 cm) se acumula un mayor contenido de MOS, el cual disminuye con respecto a la profundidad, por lo que el efecto sobre la estructura (y, por ende, la porosidad) desciende significativamente. Por tanto, a medida que se incrementa la profundidad del muestreo del suelo se observa un incremento significativo del valor de la ρ_b en todos los tratamientos (Cuadro 1), inversamente correlativo a la pérdida de MOS.

Cuadro 1. Valores de la densidad aparente (ρ_b) y la compactación edáficas (0-30 cm) con diferentes usos del suelo (pastizal PZ y cacaotal SAFC) en el Sudeste mexicano.

| Tratamiento | ρ_b (Mg m ⁻³) | | | Compactación (MPa) | | | MOS |
|---------------|--------------------------------|---------------|------------|--------------------|------------|------------|------------|
| | Profundidad (cm) | | | Profundidad (cm) | | | (%) |
| | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 0-10 | 10-20 | 20-30 | 0-30 |
| PZ5 | 1,1 ±0,16 | 1,3 ±0,10 | 1,4 ±0,19 | 4,4 ±1,1a | 3,9 ±0,96a | 4,2 ±0,93a | 2,5 ±0,85a |
| PZ10 | 1,0 ±0,40 | 1,1 ±0,11 | 1,3 ±0,21 | 4,7 ±1,1a | 4,9 ±1,01a | 4,3 ±0,46a | 3,5 ±0,75a |
| PZ20 | 1,3 ±0,13 | 1,3 ±0,14 | 1,4 ±0,16 | 4,4 ±1,0a | 4,7 ±0,58a | 4,2 ±0,75a | 2,5 ±1,6a |
| SAFC35 | 1,0 ±0,03 | 1,2 ±0,05 | 1,3 ±0,10 | 3,5 ±0,5a | 4,7 ±0,76a | 4,5 ±0,50a | 2,8 ±1,9a |
| Media | 1,1 ±0,40a | 1,2 ±0,14b | 1,3 ±0,21c | 4,3 | 4,6 | 4,3 | |

§Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$). PZ: pastizal; SAF: sistema agroforestal cacao; MOS: materia orgánica del suelo.

No se registraron diferencias estadísticamente significativas relativas a los valores relativos a la compactación en las capas superficiales del suelo, tanto para el factor tratamiento como para el factor profundidad (Cuadro 1).

Propiedades fisicoquímicas del suelo.

Con relación a la capacidad de intercambio catiónica (CIC) de los suelos ésta fue significativamente mayor en el SAFC35, PZ5 y PZ10, estadísticamente iguales entre ellas (27, 27 y 23 cmol(+) kg⁻¹). El significativamente menor valor de la CIC se tuvo en el pastizal más longevo (PZ20; Cuadro 2).

Propiedades bioquímicas del suelo.

No se observaron diferencias estadísticas en los contenidos de COS y NTS entre los diferentes tratamientos (Cuadro 2). La relación C/N edáfica en el SAFC es también significativamente similar a los sistemas del pastizal (Cuadro 2), también consecuencia de la alta variación espacial de los suelos.

En cuanto a la distribución vertical del COS su contenido fue significativamente superior en la profundidad de 0-10 cm para los tratamientos SAFC35 y PZ10

(alrededor de 33 mg C g⁻¹), entre los que no hubo diferencia estadística (Cuadro 3). Los tratamientos PZ5 y PZ20 presentaron los menores porcentajes de COS (siendo del orden de 22 mg C g⁻¹). Para la profundidad de 10-20 cm y de 20-30 cm el COS no presentó diferencia significativa para ninguno de los tratamientos (Cuadro 3), siendo en todo caso significativamente inferiores a los de la capa superficial edáfica.

Cuadro 2. Contenidos de COS y algunas propiedades químicas edáficas (0-30 cm) de una cronosecuencia de cambio de Pastizal:SAFC en el Sudeste mexicano.

| Tratamiento | COS | NTS | CIC | C/N |
|-------------|-----------------------|-----------|-----------------------------|----------|
| | (mg g ⁻¹) | | (cmol(+) kg ⁻¹) | |
| PZ 1-5 | 15 ±5,3a | 1,5 ±0,3a | 23,7 ±0,5ab [§] | 10 ±5,2a |
| PZ 6-10 | 20 ±4,6a | 1,6 ±0,1a | 27 ±4,1a | 13 ±3,5a |
| PZ 11-20 | 15 ±9,5a | 1,5 ±0,4a | 21 ±3,3b | 10 ±3,6a |
| SAFC 20-35 | 17 ±10a | 1,6 ±0,1a | 27 ±3,2a | 10 ±6,0a |
| CV | 36,3 | 12,6 | 11,9 | 24,2 |
| Pr > F | 0,18 | 0,59 | 0,05 | 0,72 |

[§]Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Cuadro 3. Distribución vertical del COS en una cronosecuencia de pastizales y SAFC en el Sudeste mexicano (por capas edáficas).

| Tratamiento | COS (%) | | | COS (Mg C ha ⁻¹) |
|-------------|--------------------------|------------|------------|---------------------------------|
| | Profundidad (cm) | | | |
| | 0-10 | 10-20 | 20-30 | |
| PZ 1-5 | 2,3 ±0,15ab [§] | 1,3 ±0,65a | 0,8 ±0,57a | 46,8 ±7,1b |
| PZ 6-10 | 3,6 ±0,90a | 1,5 ±0,34a | 1,1 ±0,70a | 82,4 ±9,0a |
| PZ 11-20 | 2,1 ±0,78b | 1,6 ±0,55a | 0,9 ±0,35a | 63,4 ±8,9ab |
| SAFC 20-35 | 3,3 ±0,28ab | 1,0 ±0,10a | 0,7 ±0,10a | 34,7 ±3,1b |

[§]Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Discusión

Propiedades físicas del suelo.

El incremento de la ρ_b por el continuo pisoteo del ganado bovino es común en los pastizales, ya que ocasiona compresión en la capa superficial del suelo, reduciendo el espacio poroso e incrementando la ρ_b , que es lo que se observa en PZ20. Como la cantidad de MOS es significativamente la misma, no se le puede atribuir a su cantidad que promueve una menor agregación; incluso no es detectable un cambio en la calidad húmica, dado que no se observa ninguna variación significativa en la relación C/N edáfica (Cuadro 2). Nascente *et al.* (2015) encontraron que la concentración del MOS se correlacionó negativamente con la ρ_b en la capa superficial (0-10 cm) de los suelos estudiados; es decir a una mayor concentración de MOS se tuvo una menor ρ_b .

Una elevada compactación y alta ρ_b afecta negativamente la productividad del sistema agroforestal, ya que ambas condiciones no permiten una adecuada penetración de las raíces de las plantas, además de que la nutrición se torna difícil, debido a que los flujos internos de aire, agua y calor se dificultan ante la disminución del espacio poroso.

Propiedades fisicoquímicas del suelo.

El valor significativamente inferior de la CIC parece indicar una pérdida de calidad edáfica tras 20 años del cambio de uso del suelo (del SAFC por el sistema pastizal), pero no se manifiesta en los valores de la relación C/N, que no se modificaron con el cambio del uso.

Liang *et al.* (2005) indicaron que, independientemente de la cantidad de COS, la velocidad de descomposición de los RROO regula muchos procesos biogeoquímicos, específicamente los ciclos y retención de nutrientes; añadieron que estos RROO son mayormente degradados, incrementándose los compuestos aromáticos (humificación), los cuales pueden ser adsorbidos sobre la superficie de los minerales arcillosos, lo que provoca en el suelo una mayor área superficial específica, reflejándose en una mayor CIC, tal como debe suceder en el SAFC del presente trabajo. Esa bondad del complejo arcillohúmico del sistema agroforestal

es evidente que se va deteriorando con el pastoreo, dado que tanto la densidad aparente (ρ_b) como la CIC se deterioran a medio plazo (PZ20).

El coeficiente de regresión entre las variables MOS y CIC fue de 0,65 ($r = 0,02$), no indicando correlación significativa (Cuadro 1); ello indica que la relación C/N no detecta el cambio de calidad de la MOS, por lo que se debe recurrir a las actividades enzimáticas como se dijo.

Propiedades bioquímicas del suelo.

Algunas investigaciones recientes han documentado los efectos que los SAFC tienen sobre los indicadores de fertilidad del suelo (Isaac *et al.* (2007). Las propiedades físicas y químicas evolucionan favorablemente en la superficie edáfica (por ejemplo, 0-20 cm). Los SAFC pueden mantener importantes cantidades de COS transcurridos un tiempo prudencial (*v. g.*, de seis años) de establecimiento; a partir de entonces las propiedades edáficas tienden a estabilizarse en niveles similares a la de los bosques secundarios en su estado natural (Arévalo-Gardini *et al.* 2015).

El alto coeficiente de variación (CV) de los resultados impide se observen en el presente trabajo diferencias significativas entre estas propiedades, lo que indica que habría que acudir a parámetros más sensibles, como las actividades enzimáticas, pues deben existir impactos, dado que el cambio de uso de suelo tras la deforestación del SAFC conlleva que el suelo queda desnudo; por tanto, debe existir una obligada modificación del régimen de temperatura y humedad en el sistema que modifica la velocidad de mineralización de los RROO (hojarasca o mantillo) aportados por la vegetación arbórea del SAFC durante varios años. Aceñolaza *et al.* (1999) encontraron que el aclareo del bosque de aliso montano de la Yunga argentina aumentaba la sequedad del suelo, con lo que moderaba la descomposición, mientras que el desarrollo del dosel la aceleraba. Durante los primeros años del cambio de uso puede existir una mayor liberación de nutrientes como resultado de una mayor mineralización.

En un trabajo similar al aquí descrito Cheng y An (2015) evaluaron una cronosecuencia de pastizales desde tres hasta 56 años de edad. Sus resultados

indicaron que los pastizales de 15 años presentaron una mayor cantidad de C y N debido a que, a esa edad, el pastizal acumuló mayor cantidad de MOS, proveniente específicamente de RROO de plantas y de raíces, lo que generó una mayor aportación de COS y otros nutrientes; después de esa edad se observó una disminución en la liberación de elementos químicos en dichos sistemas. Huang *et al.* (2010) mencionaron que con los años los pastizales pierden su vocación para acumular COS debido a una baja en la productividad del sistema, sobre todo por una creciente degradación de sus propiedades, motivada por el sobrepastoreo y el tipo de pasto establecido, que es lo que debe suceder en este caso descrito aquí.

Según Goodrick *et al.* (2015) algunos sistemas agroforestales tropicales disminuyen lentamente el contenido de COS debido a los mayores contenidos de N que procuran las leguminosas (lo que acelera los procesos de mineralización), por lo que esta mayor concentración de NTS y la mayor mineralización reduce la relación C/N, existiendo en consecuencia una mayor descomposición de la MOS.

Otras investigaciones han documentado que bajo ciertas condiciones, al cambiar las tierras de cultivo a pastizales, se puede lograr un aumento en los niveles de COS de alrededor del 26 % (Don *et al.* 2011). Por otro lado, Johnson *et al.* (2007), realizaron un estudio en el que revelaron que la cantidad de COS que se puede almacenar en el suelo está en función de la cantidad de RROO que se producen e ingresan al suelo, de su composición y de la velocidad de descomposición, destacando que el componente que menos se descompone es el de las raíces de las gramíneas, debido a la gran cantidad de compuestos recalcitrantes que éstas presentan.

Los resultados encontrados para las tres primeras capas edáficas estudiadas (Cuadro 3) son similares con los reportados por Céspedes *et al.* (2012), quienes señalaron que en praderas y pastizales el mayor contenido de COS se concentra en los primeros -10 cm, concentrándose del 41 al 62 % del COS (referido al COS encontrado a -1,0 m de profundidad) en los primeros -20 cm. En este sentido Wei *et al.* (2012) compararon el contenido de COS de sistemas de pastizales y vegetación secundaria; los resultados obtenidos indicaron que los pastizales tras 20 años de establecimiento pueden llegar a acumular más del doble de la cantidad

de COS que los suelos con vegetación secundaria de más de 50 años de edad; además señalaron que en los pastizales más del 50 % de la MOS se localizó en los primeros -20 cm, mientras que en la sucesión secundaria fue de sólo el 23-31 % de la MOS (para esa misma profundidad del suelo). Sin embargo, en el presente estudio (bajo las condiciones del trópico húmedo) tras 20 años del cambio de uso de suelo (PZ20) de SAFC, disminuyó el COS en la capa de 0-10 cm, lo que indica que la humificación de los RROO aportados no compensó la pérdida de mineralización de la MOS, lo repercute negativamente en la estructura (incremento de la ρ_b) y, con ello, la porosidad de estos suelos.

Conclusiones

Se concluye que el cambio de uso de suelo de SAFC a pastizal no reduce a largo plazo los almacenes de COS (referido a 0-30 cm) de manera significativa, ni tampoco la relación C/N edáfica; la alta variación espacial de los suelos obliga a buscar otros índices más sensibles para medir el posible impacto. Así, es posible observar una modificación negativa que afecta la densidad aparente edáfica y a la CIC a medio plazo (20 años) en los -10 cm primeros, paralelamente a una caída significativa del COS a esa misma profundidad, lo que afecta negativamente la fertilidad de los suelos.

LITERATURA CITADA

- Aceñolaza P.G. y Gallardo, J.F. 1999. Leaf decomposition and nutrient release in Montane forests of Northwestern Argentina. *J. Trop. For. Sci.*, 11: 619-630.
- Arévalo-Gardini E., M. Canto, J. Alegre, O. Loli, A. Julca, V. Baligar. 2015. Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. *PloSOne* 10(7): e0136784. DOI: 10.1371/journal.pone.0136784.
- Bautista-Mora E., J. Pérez-Flores, O. Ruiz-Rosado, A. Valdéz-Balero. 2016. Uso de recursos forestales maderables y no maderables del Sistema agroforestal. *Agroproductividad* 9(2): 50-55.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. En: A. Klute (*Ed.*). *Methods of soil analysis, Part I. Physical and mineralogical methods*, 2^a. edn. American Society of

- Agronomy and SSSA. Agronomy Monograph. Madison, Wisconsin, USA, n° 9, 363-375 pp.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability. *In*: Klute, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2ª. edn. ASA, SSSA, Madison, Wisconsin. Pp: 463-478.
- Céspedes, F.F. Gobbi, J.A. Bernardis, A.C. 2012. Reservorio de carbono en suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Fitotecnia Mexicana* 35(1): 79-86.
- Chapman, H y Pratt, P.F. 1997. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Editorial Trillas, México, D.F. 195 pp.
- Cheng Man, Shao Shan An. 2015. Responses of soil nitrogen, phosphorous and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China. *J. Arid Land* 7(2): 216–223.
- Díaz-José O., J. Aguilar-Ávila, R. Rendón-Medel, V. H. Santoyo-Cortés. 2013. Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria* 40(2): 279-289.
- Don A., Schumacher J., Freibauer A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Global Change Biology* 17(4): 1658-1670.
- Goodrick I., Nelson P.N., Banabas M., Wurster C.M., Bird M.I. 2015. Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. *G.C.B. Bioenergy* 7: 263-272, DOI: 10.1111/gcbb.12138.
- Huang Y, Sun W J, Zhang W., Yu Y. 2010. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Science China Life Science*, 2010, 53: 766-775, DOI: 10.1007/s11427-010-4022-4.
- INEGI (2006). Síntesis Geográfica y anexo Cartográfico del Estado de Tabasco. Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. Disponible en línea: <<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos>>. Fecha de consulta: 20 de Septiembre de 2016.
- Isaac, M. E., Timmer V. R., Quashie-Sam S. J. (2007). Shade tree effects in an 8-year-old cocoa agroforestry system: biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78(2): 155-165.
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkinen K., Byrne K.A. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137(3): 253-268.

- Jie W., Cheng J., Li W., Liu W. (2012) Comparing the Effect of Naturally Restored Forest and Grassland on Carbon Sequestration and Its Vertical Distribution in the Chinese Loess Plateau. PLoSOne 7(7): e40123. doi:10.1371/journal.pone.0040123.
- Jiménez Ramírez, R. 2013. Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico. M.SC. Thesis. Colegio de Postgraduados, *Campus Tabasco*. H. Cárdenas Tabasco, México. 158 pp.
- Johnson J.M.F., Barbour N. W., Lachnicht W. S. 2007. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. *Soil Sci. Soc. American J.* 71: 155-162. doi:10.2136/sssaj2005.0419.
- Liang B., Lehmann J., Solomon D., Kinyangi J., Grossman J., O'Neill B, Skjemstad J.O., Thies J., Luizao F.J., Petersen J., Neves E.G. 2005. Black carbon increases cation Exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1719-1730.
- Nair PK, Ramachandran. 1997. *Agroforestería*. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 543 pp.
- Nascente Adriano Stephan, Yuncong Li, Carlos Alexandre Costa Crusciol. 2015. Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage system *Rev. Brasil. Ciencia Solo* 39: 871-879.
- NOM-021-RECNAT, 2000. Norma Oficial Mexicana, Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos, Estudio, Muestreo y Análisis. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 85 pp. <www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>.
Fecha de consulta: 15 de Enero de 2016.
- Palma LDJ, Cisneros DJ, Moreno CE, Rincón RJA. 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 195 pp.
- Ramos-Reyes R., Sánchez-Hernández R., Gama-Campillo L.M. 2016. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. 2016. *Ecosistemas y Recursos* 3(7): 32-39.
- Sánchez-Gutiérrez, F., Pérez-Flores, J., Olan, J. J. O., Sánchez, Á. S., & Ruiz-Rosado, O. (2016). Estructura arbórea del sistema agroforestal cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (14): 2695-2709. •
- Schroth G., Bede L.C., Paiva A.O., Cassano CR, Amorim AM, Faria D, Mariano-Neto E, Martini AM Z, Sambuichi RHR, Lôbo RN. 2015. Contribution of agroforests to

landscape carbon storage. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change* 20: 1175-1190.

Tadakatsu Y., Ohkura T., Matsumoto N. 2015. Ecosystem Fertility: A new paradigm for nutrient availability to plants in the humid tropics, *Soil Science & Plant Nutrition*, 61(4): 698-703, DOI: 10.1080/00380768.2015.1017439.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPITULO 5

5.1 CONCLUSIONES GENERALES




Los SAFC en Tabasco son similares en diversidad y estructura arbórea. Los más viejos establecidos en Fluvisols son ligeramente más diversos y registran mayor área basal, por lo que pueden llegar a almacenar alrededor de 91 M C ha⁻¹ entre el suelo y la vegetación arbórea, la vegetación fijó el 62% y el suelo 38%, dicha cantidad de C almacenado depende de la diversidad existente, edad del cultivo, manejo, especies presente, el área basal influye más que el número de especies.

En el componente edáfico, el C se protege en macroagregados de tamaño de 0.5-2 mm, la profundidad de 0-10 cm almacena la mayor cantidad de C y la relación C/N oscila entre 7, por lo que se advierte que el suministro de residuos frescos al suelo, es más susceptible de generar flujos de C que su conservación mediante la formación de humus.

El cambio de uso de suelo SAFC a PZ, no ocasionó una disminución significativa de la cantidad de COS almacenado (0-30 cm) durante el tiempo considerado respecto al SAFC. Sin embargo, si sólo se muestrean los -10 cm primeros del suelo, se observa una significativa compactación edáfica, junto con una caída del valor de la CIC a largo plazo (20 años).

5.2 ANEXOS

Asistencia a cursos, congresos y seminarios

| | | | | |
|--|---|---|--|---|
|  | | UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO |  | División Académica de Ciencias Agropecuarias |
| | | "ESTUDIO EN LA DUDA... ACCIÓN EN LA FE" | | |
| V Congreso Internacional de Agronomía Tropical, del 27 al 29 de septiembre de 2017 | | | | |
| Villahermosa, Tabasco, 14 de agosto de 2017 | | | | |
| COMITÉ ORGANIZADOR | Estimado(a) colega, | | | |
| Dr. César Márquez Quiroz PRESIDENTE cesar.marquez@ujat.mx | Agradecemos su interés por participar en el V Congreso Internacional de Agronomía Tropical, motivo por el cual nos complace informarle que su trabajo: | | | |
| Dr. Rodolfo Orosio Orosio | COMPARACIÓN DE DOS MÉTODOS PARA DETERMINAR CARBONO ORGÁNICO EN UN SUELO CAMBISOL | | | |
| Dr. Efraim de la Cruz Lazaro | | | | |
| Dr. Juan de Dios Mendoza Palacios | Cuyos autores son: | | | |
| Dr. Pedro García Alamilla | Miguel Juárez-Méndez Ulises López-Novarro Rufo Sánchez-Hernández | | | |
| Dr. Rufo Sánchez Hernández | Juan de Dios Mendoza-Palacios José Isabel López-Naranjo Pedro Salvador-Morales | | | |
| Dr. José Javier Huijara Vasconcelos | Ha sido aceptado para su presentación en la modalidad CARTEL . | | | |
| Cursos electrónicos ciatgrom2017@ujat@gmail.com | A partir del 4 de septiembre de 2017 podrá consultar el programa completo en nuestra página web www.ujat.mx para conocer el día y hora de su presentación. | | | |
| Facebook https://www.facebook.com/CIAT.UJAT | Le agradecemos su participación y esperamos tener la oportunidad de saludarlo(a) personalmente en Villahermosa, Tabasco. | | | |
| Página web http://www.ujat.mx/Eventos/ciatgrom2017 | Atentamente | | | |
| |  | | | |
| | PRESIDENTE DEL COMITÉ ORGANIZADOR V-CIAT 2017 | | | |



Texcoco, Estado de México, a 3 de abril de 2017.

Estimados:

Sánchez-Hernández Rufo; Salvador-Morales Pedro; Francisco-Santiago Sandra P.; Valdés-Velarde E.; López-Noverola Ulises; Cámara-Cabrales Luisa y Valencia-Hernández Ismael

Tengo el agrado de comunicarles que su trabajo intitulado:

Contenidos de carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales de cacao en Tabasco México

Ha sido **aceptado** para ser presentado de forma oral en el VIII SIMPOSIO INTERNACIONAL DEL CARBONO EN MÉXICO, que se realizará del 17 al 19 de mayo de 2017 en la ciudad de Ensenada, Baja California, en las instalaciones del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

Agradezco la atención a la presente y aprovecho la ocasión para enviarles un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Dr. Fernando Paz Pellat
Coordinador General
Programa Mexicano del Carbono

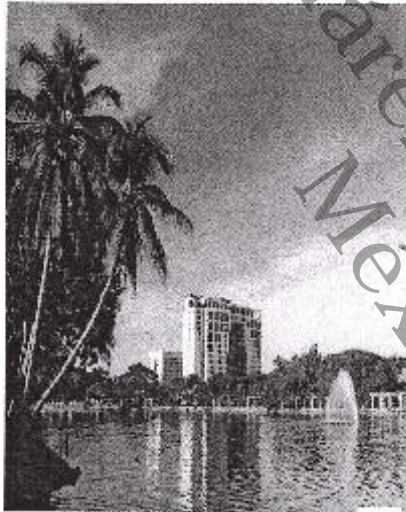




SOCIEDAD MEXICANA DE FITOGENÉTICA, A. C.
CHAPINGO, EDO. DE MÉXICO
UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
VILLAHERMOSA, TABASCO



XXVI CONGRESO NACIONAL
Y VI INTERNACIONAL DE
FITOGENÉTICA
VILLAHERMOSA, TABASCO
26 AL 30 DE SEPTIEMBRE 2016



CARTA DE ACEPTACIÓN

15 agosto 2016

Estimado socio (a):

Tenemos el agrado de informarle que su Resumen C2016_133

**ESTRUCTURA ARBÓREA DEL SISTEMA
AGROFORESTAL CACAO EN LA CHONTALPA,
TABASCO**

Autores

Pedro Salvador-Morales - Instituto Tecnológico de la Zona Olmeca (ITZO); Estudiante de Doctorado de la UJAT División Académica de Ciencias Biológicas.
Luisa del Carmen Cámara-Cabrales - UJAT División Académica de Ciencias Biológicas
Rufo Sánchez-Hernández - UJAT División Académica de Ciencias Agropecuarias
Eduardo Valdés-Velarde - Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.
José Luis Martínez-Sánchez - UJAT División Académica de Ciencias Biológicas.

Ha sido aceptado para exponerlo en forma de cartel en nuestro Congreso de Fitogenética, el cual se llevará a cabo en Villahermosa, Tabasco, México, del 26 al 30 de septiembre del 2016, en las instalaciones de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Posteriormente le haremos saber la fecha y mesa que le corresponderá.

Gracias por compartir los resultados de su investigación a la comunidad científica, lo que permitirá darle mayor realce a este magno evento.

ATENTAMENTE

Dr. Bulmaro Coutiño Estrada
Secretario Organizador

<http://congreso.socmefi.mx>

Tel 01 800 088 2222 Ext 86506

Infocongreso@socmefi.mx

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA ZONA
OLMECA Y LA DIVISIÓN DE CIENCIAS AGROPECUARIAS (UJAT)
OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

PEDRO SALVADOR MORALES

POR SU PARTICIPACIÓN COMO ASISTENTE EN EL II CURSO
INTERNACIONAL DE "MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO".

REALIZADO DEL 22 AL 26 DE OCTUBRE DE 2018, CON UNA
DURACIÓN DE 40 HORAS.

VILLA OCUILTZAPOTLÁN, CENTRO, TABASCO, OCTUBRE DE 2018.



M.C. JOSÉ JAVIER PERALTA
COSGAYA
DIRECTOR DEL INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE LA ZONA OLMECA

PH.D. ROBERTO ANTONIO
CANTÚ GARZA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS AGROPECUARIAS (UJAT)



REV. D



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA BIODIVERSIDAD ACCIÓN EN LA TERCERA DIMENSIÓN"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS AGROPECUARIAS

Oficina de la presidencia

CONSTANCIA

Pedro Salvador Morales

A:

Por su participación como Asistente al Curso-Taller denominado "IV Curso Internacional de Suelos Tropicales. Servicios Ecosistémicos de los Suelos", impartido del 26 de Julio al 4 de Agosto de 2018, con una duración de 80 horas.

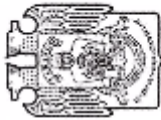
U.A.T.

Valferrnosa, Tabasco; Lunes 6 de Agosto de 2018



Ph.D. Roberto Antonio Cantú Garza

DIRECTOR



La División Académica de Ciencias Biológicas de la
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco



Otorga la presente

Constancia

A: PEDRO SALVADOR MORALES

Por su participación en el **SEMINARIO DE POSGRADO DE LA DACBioI "Entre pozol y pozol . . . platicamos"** y contribuir al seguimiento académico de los estudiantes de posgrado en la **LGAC "Biología, Ecología y Manejo de Organismos y Ecosistemas Terrestres"**, llevado a cabo el 23 de mayo de 2018 en la ciudad de Villahermosa, Tabasco.

M.C. Rosa Martha Padrón López
Directora de la División Académica
de Ciencias Biológicas



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

PMC

Programa Mexicano del Carbono

RED TEMÁTICA DEL CONACYT



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
"Científica, Innovadora y Transversal"

otorgan la presente

CONSTANCIA



A: *Pedro Salvador Morales*

Como miembro de la Red Temática Programa Mexicano del Carbono,
Colectivo de Investigación reconocido por el Consejo Nacional de
Ciencia y Tecnología (CONACYT), administrada por el
Instituto Tecnológico de Sonora

Ciudad Obregón, Sonora, México a 7 de diciembre de 2017



Dr. JUAN GAUDINZA PAYÁN
Responsable Técnico

Red Temática Programa Mexicano del Carbono



Dr. FERNANDO PAZ PELÁIZ
Coordinador General

Programa Mexicano del Carbono



La Universidad de Quintana Roo,
la Universidad Nacional Autónoma de México y
la Asociación Mexicana de Estudios sobre el Karst

Otorgan la presente Constancia a

Pedro Salvador Morales

en virtud de haber acreditado las actividades
correspondientes al “III Curso internacional en
edafología aplicada sobre suelos del trópico mexicano”
con duración de 80 horas.



Dr. Alberto Pereira Corona

Dr. Alberto Pereira Corona
UQROO

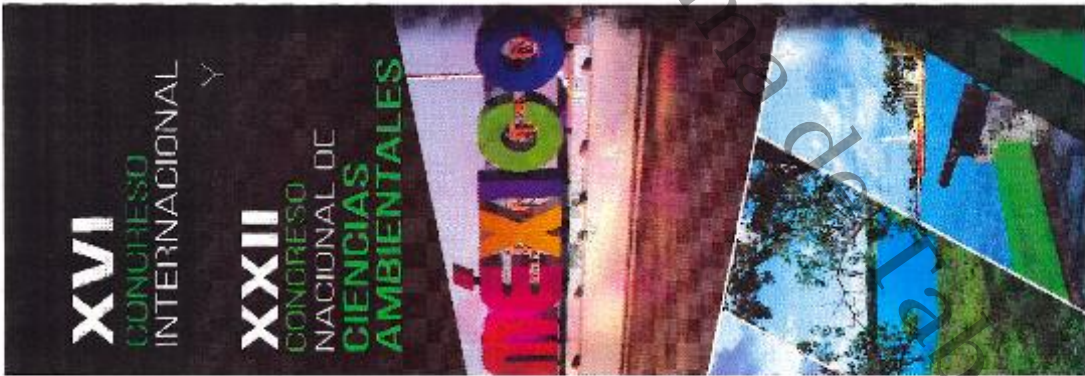
Dr. Francisco-Bautista Zúñiga

Dr. Francisco-Bautista Zúñiga
UNAM

Dra. Patricia Krugnis Servón

Dra. Patricia Krugnis Servón
AMEK, A.C.

Julio 17 al 27 del 2017



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

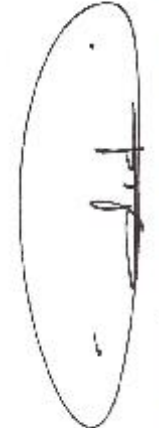


Universidad de Quintana Roo
 Facultad de Ciencias Ambientales
 Cursado
 XVII Congreso Nacional
 y XXII Congreso Nacional
 de Ciencias Ambientales
 A:
 Constancia

PEDRO SALVADOR MORALES, LUISA DEL CARMEN CÁMARA CABRALES,
 RUIFO SANCHEZ HERNÁNDEZ, MIRIAM GÁLLEGOS GONZÁLEZ Y
 SALOMÓN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ.

POR HABER IMPARTIDO LA PONEENCIA DENOMINADA
 "ESTIMACIÓN DE BIOMASA ARBOREA EN EL SISTEMA AGROFORESTAL CACAO
 EN TABASCO, MÉXICO".

DEL 7 AL 9 DE JUNIO DE 2017 EN LA UNIDAD ACADÉMICA CHETUMAL DE LA
 UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO.



MTRO. ÁNGEL E. RIVERO PALOMO RECTOR
 DRA. GISELA V. CAMPOS ÁNGELES
 PRESIDENTE ANCA



otorgan el presente

Reconocimiento

a: **Sánchez-Hernández Rufo; Salvador-Morales Pedro; Francisco-Santiago Sandra P.; Valdés-Velarde E.; López-Noverola Ulises; Cámara-Cabrales Luisa y Valencia-Hernández Ismael**

Por su participación como **PONENTE** en la modalidad Oral con el tema:
"Contenidos de carbono orgánico del suelo en sistemas agroforestales de cacao en Tabasco, México"

En el VIII Simposio Internacional del Carbono en México celebrado en las instalaciones del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) Ensenada, Baja California del 17 al 19 de Mayo de 2017

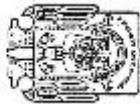


[Handwritten signature]

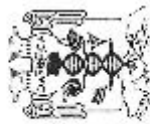
Dr. Fernando Paz Pital
Coordinador General
Programa Mexicano del Carbono

[Handwritten signature]

Dr. José Martín Hernández Avon
Coordinador Científico
Programa Mexicano del Carbono



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIVISIÓN ACADÉMICA DE
CIENCIAS AGROPECUARIAS



Otorga la presente

CONSTANCIA
A Pedro Salvador Morales

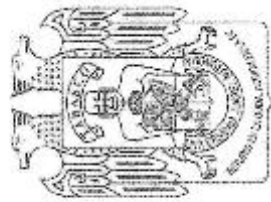
Por haber participado en el Curso Internacional "Captura de Carbono en Agrosistemas Tropicales" realizado del 21 al 25 de Noviembre en la División Académica de Ciencias Agropecuarias, con una duración de 30 horas.

Minimosa, Tabasco: Miércoles 25 de Noviembre de 2016


Dr. Roberto Flores Bello
Director de la DACA


Dr. Eduardo Valdés Velarde
Co-organizador del evento


Dr. Rufo Sánchez Hernández
Co-organizador del evento



La Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco otorgan la presente **CONSTANCIA** a



Pedro Salvador Morales

Por haber presentado el trabajo

ESTRUCTURA ARBÓREA DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO EN LA ZONA DE CHONTALPA, TABASCO

P. Salvador-Morales, L.C., Cámara-Cabrales, R., Sánchez-Hernández, E., Valdés-Velarde, J.L., Martínez-Sánchez

Como Poster en el XXVI Congreso Nacional y VI Internacional de Fitogenética celebrado en Villahermosa, Tabasco del 26 al 30 de septiembre de 2016.



XXVI Congreso Nacional y VI Internacional de Fitogenética

Dr. Serafín Cruz Izquierdo
Presidente de la Sociedad

Serafín Cruz Izquierdo

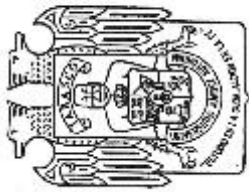
Dr. Sulmaro Cossío Estrada
Secretario General del Congreso

Dr. Roberto Flor Ballejo
Presidente de la Cruz Lázaro

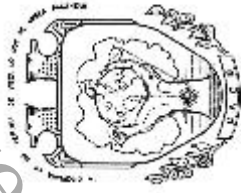
Roberto Flor Ballejo

Dr. Efraín de la Cruz Lázaro
Presidente del Comité Organizador Local

Efraín de la Cruz Lázaro



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



OTORGA LA PRESENTE
CONSTANCIA

AL C. PEDRO SALVADOR MORALES

Por haber asistido al "CURSO DE SERVICIOS AMBIENTALES" llevado a cabo del 9 al 20 de Marzo del 2015, con una duración de 30 hrs.

ROSA MARTHA PADRÓN LÓPEZ
DIRECTORA DE LA DACBIOL