



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**EVALUACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN
AGROSISTEMAS EN LA ZONA SIERRA DE TABASCO**

TESIS

Que para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE
SISTEMAS TROPICALES**

Presenta

ALFREDO ISAAC BRINDIS SANTOS

Directores

DRA. ENA EDITH MATA ZAYAS

DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

Villahermosa, Tabasco, México

Febrero, 2020



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

FEBRERO 04 DE 2020

**C. ALFREDO ISAAC BRINDIS SANTOS
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: **"EVALUACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN AGROSISTEMAS EN LA ZONA SIERRA DE TABASCO"**, asesorado por la Dra. Ena Edith Mata Zayas y Dr. David Jesús Palma López, sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Rufe Sánchez Hernández, Dr. Joel Zavala Cruz, Dr. David Jesús Palma López, Dra. Ena Edith Mata Zayas, Dra. Lilia María Gama Campillo, Dra. Luisa del Carmen Cámara Cabrales y Dr. Facundo Sánchez Gutiérrez.

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

DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



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



KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400 y 6401, 337-9611, 337-9706, Fax (993) 354-4308 y 358-1579

Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y desperdicio de agua y ayuda a conservar los bosques

www.ujat.mx

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: **"EVALUACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN AGROSISTEMAS EN LA ZONA SIERRA DE 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 04 días del mes de febrero de dos mil veinte.

AUTORIZO



ALFREDO ISAAC BRINDIS SANTOS

DEDICATORIA

Este documento se lo dedico con todo mi amor y cariño a las cuatro personas más importantes en mi vida, gracias por su sacrificio, esfuerzo y por creer en mi capacidad, aun que hemos pasado momentos difíciles, siempre han estado brindándome su cariño, comprensión y amor. ¡gracias!

Itzel, Itzayana, Isabella, Norma.

AGRADECIMIENTOS

A la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, por brindarme la oportunidad de 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 en mi formación doctoral.

Al National Science Foundation - Partnerships in International Research and Education (PIRE), a través del proyecto "Sustentabilidad, Servicios Ecosistémicos y Desarrollo de la Bioenergía en las Américas" por el financiamiento para el trabajo de campo del presente proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Chiapas por facilitarme el permiso para realizar mi estudio doctoral.

Al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco por todo el apoyo brindado para realizar mi estancia doctoral, así como las facilidades brindadas en el laboratorio de suelo y planta para procesar las muestras de suelo y vegetación arbórea.

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

A la Universidad Autónoma de Chapingo por el apoyo brindado para realizar mi estancia doctoral y los análisis de C, N y S.

A mis directores de tesis Dra. Ena Edith Mata Zayas y al Dr. David Jesús Palma López, por su asesoría permanente en la elaboración del proyecto de investigación, redacción de los artículos y desarrollo de la tesis.

Al Dr. Rufo Sánchez Hernández por su acompañamiento constante en la redacción de los artículos científicos y por compartir conmigo ese amor por el suelo.

Al Dr. Joel Zavala Cruz por enseñarme su pasión por la geomorfología, la cual sin lugar a duda me transmitió.

Al comité tutorial por su asesoría permanente para mejorar el presente proyecto de investigación.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
CAPITULO 1.....	3
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2. Justificación.....	6
1.3 Antecedentes.....	7
1.4 Objetivo General.....	14
1.4.1 Objetivos Específicos.....	14
CAPITULO 2.....	16
MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 El ciclo global del carbono.....	16
2.2 Los sumideros naturales de CO ₂	18
2.3 Almacenamiento de carbono en el suelo.....	18
2.4 Fracciones del carbono orgánico en el suelo.....	20
2.5 Vegetación natural como almacén de carbono.....	21
Literatura citada.....	23
CAPITULO 3.....	36
PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EN PLANICIES Y TERRAZAS DE TABASCO, MÉXICO.....	36
CAPITULO 4.....	67
ALMACENAMIENTO DE CARBONO EDÁFICO EN DIFERENTES AGROSISTEMAS EN TABASCO, SURESTE DE MÉXICO.....	67
CAPITULO 5.....	99
ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE AGROSISTEMAS TROPICALES EN TABASCO, MÉXICO.....	99
CAPITULO 6.....	124
DISCUSIÓN GENERAL Y CONSIDERACIONES FINALES.....	124
Literatura citada.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2: Marco Teórico

Figura 1. El ciclo del carbono.....	17
Figura 2. Proceso que afecta la dinamica del carbono orgánico del suelo.....	19

Capítulo 3: Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en planicies y terrazas de Tabasco, México.

Figura 1. Paisajes Geomorfológicos de la zona Sierra de Tabasco.....	46
Figura 2. Relieve/modelados en la zona Sierra Tabasco,México.....	48
Figura 3. Unidades de suelo en la Zona Sierra Tabasco, México.....	54
Figura 4. Transectos en la PTTJ, de Suroeste a Noreste y Noreste a Suroeste, representan la relación relieves y unidades de suelo.....	55

Capítulo 4: Almacenamiento de carbono edáfico en diferentes agrosistemas en Tabasco, sureste de México.

Figura 1. Mapa del área de estudio en la Región Sierra de Tabasco, México.....	79
Figura 2. Diseño de muestreo de suelo en plantaciones de palma de aceite, en Tabasco, México.....	80
Figura 3. Almacenamiento de C en suelo de cinco agrosistemas tropicales.....	88

Capítulo 5: Estimación de la biomasa aérea y almacenamiento de Carbono en agrosistemas tropicales en Tabasco, México.

Figura 1. Estimación de la biomasa aérea total en agrosistema tropicales en Tabasco, México.....	108
Figura 2. Número de árboles tropicales distribuidos por clase diamétrica en bosque secundario.....	109
Figura 3. Número de árboles tropicales distribuidos por clases de altura en boque secundario en suelos con horizontesA/B/C.....	112

Figura 4. Carbono almacenado en la biomasa de agrosistemas tropicales.....	114
--	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1: Introducción general.

Tabla 1. Captura de carbono en <i>E. guineensis</i> Jacq. En los compartimentos de biomasa aérea y suelo en diversas partes del mundo.....	8
--	---

Capítulo 3: Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en planicies y terrazas de Tabasco, México.

Tabla 1. Relieve/modelado y variabilidad de las unidades de suelos en el sur de Tabasco, México.....	45
--	----

Capítulo 4: Almacenamiento de carbono edáfico en diferentes agrosistemas en Tabasco, sureste de México.

Tabla 1. Propiedades físicas de los suelos en la zona Sierra, Tabasco, México.....	77
Tabla 2. Análisis estadístico del pH del suelo en agrosistemas tropicales en la Zona Sierra de Tabasco.....	78
Tabla 3. Características químicas de los suelos tropicales en la Región Sierra de Tabasco (México).....	81
Tabla 4. Almacenamiento de carbono en suelo (Mg C ha^{-1}) en agrosistemas tropicales en Sureste de México.....	83

Capítulo 5: Estimación de la biomasa aérea y almacenamiento de carbono en agrosistemas tropicales en Tabasco, México.

Tabla 1. Datos dasométricos en tres edades de <i>Elaeis guineensis</i> Jacq. en la región Sierra de Tabasco, México.....	106
Tabla 2. Contenido de Carbono en diferentes partes fisiológicas de la palma de aceite en Tabasco, México.....	106

RESUMEN

Los agrosistemas tropicales juegan un papel de vital importancia en la regulación del clima y pueden ser considerados como una alternativa para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas al Cambio Climático Global (CCG). Dichas emisiones pueden ser mitigadas mediante la captura de Carbono (C) en cultivos perennes como la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.), bosques secundarios y pastizales. Por ello, esta investigación se enfocó en determinar el potencial de almacenamiento de carbono de los compartimentos suelo y biomasa vegetal en tres tipos de sistemas de origen antrópico (agrosistemas de palma de aceite, pastizales y bosques secundarios) en la zona de La Sierra, en Tabasco, México. Para un mejor entendimiento de los compartimentos en estos sistemas, se zonificaron los paisajes geomorfológicos, se generó el relieve/modelado y se determinaron los grupos de suelos presentes. Para generar la cartografía de suelos se emplearon ortofotos, modelo digital de elevación y se verificó en campo. En el compartimento edáfico, se estimó el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno (N) y la relación C/N en suelos con palma de aceite (PA) en diferentes edades (cinco, ocho y dieciocho años), pastizales (PZ) y bosques secundarios (BS). Para ello, se establecieron unidades de muestreo temporales de 1200 m² en suelos Lixisols (LX) y Luvisols (LV). Para estimar el almacenamiento de COS y el Nt, en cada parcela se muestreo a profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Para determinar el carbono almacenado en la biomasa aérea (tallo y hoja), se estimó la cantidad de biomasa aérea total (BAT) en la palma de aceite de las tres edades, pastizal, y se considero como tratamiento control el bosque secundario. Se midieron datos dasométricos (diámetro y altura) en palma de aceite y se inventariaron las especies arbóreas para determinar la biomasa aérea a través de ecuaciones alométricas. En el caso del pastizal, se determinó la relación entre materia seca y húmeda, y se calcularon los contenidos de carbono. La cartografía elaborada a escala 1:50,000 permitió explicar la distribución geográfica de las unidades de suelo en las diferentes geoformas y relieve/modelados. Las plantaciones de palma de aceite mostraron un reducido potencial de C capturado en el suelo en comparación con el BS, pero sugieren que el COS podrían aumentar con el tiempo a niveles iguales o superiores al PZ. El carbono de la biomasa aérea total (BAT) se almacena principalmente en el bosque secundario. Sin embargo, *E. guineensis* Jacq. supera en un 100% al agrosistema de pastizal en los contenidos de C almacenado en la BAT.

ABSTRACT

Tropical agrosystems play a vital role in climate regulation and can be considered as an alternative to minimize greenhouse gas (GHG) emissions associated with Global Climate Change (GCC). These emissions can be mitigated by capturing Carbon (C) in perennial crops such as oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.), secondary forests and pasturelands. Therefore, this research focused on determining the carbon storage potential of soil and biomass compartments in three types of anthropogenic systems (oil palm agrosystems, pasturelands and secondary forests) at La Sierra Region, in Tabasco, Mexico. For a better understanding of the compartments in these systems, the geomorphological landscapes were zoned, the relief/modeling was generated and the soil groups were determined. To generate the soil maps, orthophotos and digital elevation model were used, followed of field validation. In the edaphic compartment, the content of soil organic carbon (COS), nitrogen (N) and the C/N ratio was estimated in soils of oil palm (PA) at different ages (five, eight and eighteen years), pasturelands (PZ) and secondary forests (BS). For this, temporary sampling units of 1200 m² were established on Lixisols (LX) and Luvisols (LV) soils. To estimate the storage of COS and Nt, each plot was sampled at depths of 0-20, 20-40 and 40-60 cm. To determine the carbon stored in the aerial biomass (stem and leaf), the amount of total aerial biomass (BAT) from oil palm and pastureland was estimated; the secondary forest was considered as a control treatment. Dasonometric data (diameter and height) in oil palm were measured and tree species were inventoried to determine aerial biomass through allometric equations. For pastures, the relationship between dry and wet matter was determined, and carbon content was calculated. The cartography elaborated at 1:50,000 scale allowed to explain the geographical distribution of the soil units in the different geofoms and relief/modeling. Oil palm plantations showed a reduced potential of C captured in the soil compared to the BS, but suggest that COS could increase over time to levels equal to or greater than PZ. The total aerial biomass carbon (BAT) is mainly stored in the secondary forest. However, *E. guineensis* Jacq. 100% exceeds the pastureland in the contents of C stored in the BAT.

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los informes más recientes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (CC) (IPCC, por sus siglas en inglés) estiman que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1.0°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8 a 1.2°C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1.5°C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (IPCC, 2018). Asimismo, indican que el aumento de las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorocarbonos (CFC) y vapor de agua, contribuyen a un incremento global de la temperatura. Con implicaciones en las emisiones anuales de GEI las cuales crecieron alrededor de 80% entre el año 1970 y 2004, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt) (IPCC, 2007). Los GEI coadyuvan al CC y al calentamiento global (CG) afectando a la atmósfera, a las profundidades del océano y a la masa de la tierra terrestre, ya que se ha observado y medido cambios de la ubicación y el comportamiento de las especies de fauna y flora con afectaciones directas en el funcionamiento de los ecosistemas naturales (Acosta, 2001; Hernández *et al.*, 2008; Melillo *et al.*, 2016; Prasad *et al.*, 2017). El dióxido de carbono (CO₂) es considerado como uno de los gases de efecto invernadero con mayores implicaciones en el CC puesto que su contribución se ha calculado entre el 50 y 75% del total de los GEI (Díaz-Franco *et al.*, 2007). El CO₂ en la atmósfera aumentó de 280 ppm en la era preindustrial a 410 ppm en el año 2019, debido al uso de combustibles fósiles (Prentice *et al.*, 2001; NOAA, 2019).

México cuenta con una extensa superficie de terrenos forestales, que hoy representan un sistema potencial para capturar carbono (C) y así mitigar el efecto del cambio climático global (CCG) (Etchevers, 2001). La absorción de CO₂ atmosférico a través de las plantas, debido a procesos fisiológicos como la fotosíntesis y el almacenamiento en forma de biomasa es una de las estrategias más viables para la mitigación del CCG (Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Murgueitio *et al.*, 2014). Los ecosistemas forestales contienen grandes cantidades de C que se almacenan en la biomasa viva y muerta, así como en el suelo (De Jong, 2001). Otro gran sumidero de C son los

suelos agrícolas, los cuales representan uno de los mayores depósitos de C del planeta, y tienen potencial para expandir el secuestro de carbono y de esta manera mitigar la creciente concentración atmosférica de CO₂ (Robert, 2002; Segura-Caustrita *et al.*, 2005, Sánchez-Hernández *et al.*, 2011). En este mismo sentido, los agrosistemas terrestres juegan un papel vital en la regulación del balance de los GEI por la importancia en la producción de la biomasa vegetal, debido a que su función natural es capturar C contribuyendo a la disminución del CCG (Hungate *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2017). Dichas emisiones se pueden minimizar mediante el uso de cultivos perennes como la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), hule (*Hevea brasiliensis*), pastizales, teca (*Tectona grandis* L. f.) y bosques secundarios, entre otros; debido a que estos agrosistemas tienen el potencial de capturar C en la biomasa aérea y en el suelo para el beneficio del medio ambiente (Smith *et al.*, 2012; Wiesmeier *et al.*, 2015; Aryal *et al.*, 2017; Quintero-Méndez y Jerez-Rico, 2017; Salgado *et al.*, 2019).

En este contexto, el agrosistema de *E. guineensis* Jacq., se caracteriza por mantenerse durante su ciclo productivo en un mismo suelo sin perturbar, y con apenas la extracción del fruto del agrosistema, por lo tanto, este tiene el potencial para ayudar a mitigar los impactos negativos del calentamiento global. Por lo que el presente trabajo de investigación consistió en: determinar el potencial de almacenamiento de carbono de los compartimentos: suelo y biomasa vegetal, en tres tipos de vegetación de origen antrópico (agrosistemas de palma de aceite, pastizales y bosque secundario) en la zona Sierra del estado de Tabasco. Con la finalidad de discernir si las plantaciones de palma de aceite pueden contribuir a mitigar el cambio climático global (CCG) provocado por el incremento del fenómeno del calentamiento global.

1.1 Planteamiento del problema.

El cambio climático inducido por las actividades antropogénicas es un problema mundial que afecta de forma negativa a la biodiversidad terrestre y acuática, que trae como consecuencia baja productividad agrícola, aumentos y desbordamientos fluviales, sequías prolongadas y derretimiento de los casquetes polares; provocando el aumento del nivel de agua en los océanos, lo que causaría inundaciones y erosión en las zonas costeras (IPCC, 2014). Se estima que el incremento de los principales GEI CO₂, N₂O, CH₄ y O² en la atmósfera, producirá un aumento en

la temperatura media global entre 3 y 5 °C en los próximos cien años, y esto afectará las condiciones climáticas (IPCC, 2001).

El aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera es la principal causa del cambio climático, debido a la quema de combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas, tala y quema de bosques (UCS, 2019). Las emisiones de dióxido de carbono han aumentado en casi un 40% en comparación con el periodo previo a la Revolución Industrial. Debido a que el CO₂ absorbe calor, ha aumentado la cantidad de calor para el equilibrio térmico de la Tierra (Solomon *et al.*, 2007; Stone *et al.*, 2009). Otro problema con el CO₂ es que se mantiene por mayor tiempo en la atmósfera en comparación con los otros GEI que atrapan el calor; sin embargo, en el caso de CO₂, gran parte de las emisiones actuales desaparecerán en un siglo, pero alrededor del 20% seguirá existiendo en la atmósfera aproximadamente dentro de 800 años (Forster *et al.*, 2007).

En México los cambios de uso de suelo han afectado principalmente a los bosques y selvas que se ubican a lo largo del territorio nacional en zonas tropicales y templadas (Barton-Bray, 2004). En los últimos 60 años esta tendencia ha sido muy similar en el estado de Tabasco, la conversión de suelo se realizó en zonas donde se contaba con ecosistemas naturales, convirtiéndose para actividades que potencializaban la economía de la sociedad tabasqueña como la ganadería, o se cambiaron en importantes industrias o grandes zonas habitacionales debido a que el campesino migro a las ciudades (Ramos-Reyes *et al.*, 2019). Asimismo, trajo cambios hacia un mayor número de ejidos que se dedican a las actividades de producción agrícola y establecimientos de cultivos industriales (Sánchez-Munguía, 2004). En Tabasco se ha establecido el cultivo palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) debido a que se considera una planta altamente productora de aceite vegetal y muy rentable económicamente (Arias *et al.*, 2013). Además, el estado, posee potencial agroclimático y edáfico para cultivar *E. guineensis* Jacq., lo que ha permitido que el cultivo agrícola incrementará la superficie establecida en un 22 % en el año 2016 con respecto al año 2007. Aunado a esto, en el año 2016 a nivel nacional se establecieron 90,118.24 hectáreas, de ellas el estado de Tabasco concentra el 20 % lo que representa alrededor de 16 mil hectáreas plantadas con esta especie (SIAP, 2016). Sin embargo, existen experiencias en Brasil, Tailandia y Malasia en las cuales el establecimiento de este agrosistema tropical ha generado un fuerte impacto ambiental y la emergencia de movimientos sociales en contraposición a dichas propuestas (Vega, 2007). En contraste, en el sureste mexicano se han realizado algunas

investigaciones para contradecir o confirmar el beneficio económico o impacto social de este cultivo (Ávila y Ávila, 2015; Isaac-Marques *et al.*, 2016). Así como evaluar y clasificar los suelos por su fertilidad para el manejo sustentable de *E. guineensis* Jacq. (Salgado-Velázquez *et al.*, 2017). Por su parte Ramos-Escalante *et al.* (2018) en el trópico húmedo de Chiapas, argumentan que *E. guineensis* Jacq. tiene potencial de capturar carbono relacionado la formación de biomasa, y que es importante en la mitigación del cambio climático. Si bien es cierto que se han hecho esfuerzos para explicar si *E. guineensis* Jacq. representa una alternativa para resolver algunos aspectos negativos de la deforestación, así como su potencial para capturar C en la biomasa aérea y en el compartimento suelo, es necesario conocer el potencial de captura de C que tiene el agrosistema a través del tiempo.

1.2. Justificación

En el trópico, el cambio climático ha contribuido en la frecuencia e incremento de las precipitaciones hasta formar tormentas y huracanes, generando problemas para la mayoría de los productores (Altieri *et al.*, 2015). El cambio climático es un problema que requiere acciones concretas, por lo que en el año 1997 se firmó el Protocolo de Kyoto que establece compromisos para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI). Entre otras acciones, impulsan e incentivan las plantaciones agroforestales y forestales con fines de captura de carbono (Somarriba *et al.*, 2008). Sin embargo, los sistemas de producción agrícola y agroforestales, aún no están considerados dentro de los llamados mecanismos de mitigación para el calentamiento global (Leblanc *et al.*, 2006; Ramos-Escalante *et al.*, 2018).

En este sentido, el presente ensayo experimental evaluó la capacidad de *E. guineensis* Jacq. para almacenar C, debido a que el cultivo tiene una vida económica de 25 a 30 años, y para entonces la biomasa total (aérea y suelo) en promedio generan 100 toneladas por hectárea, que representa entre 40 a 50 toneladas de C por hectárea (Henson, 2004; Smith *et al.*, 2012); para tener una idea sobre el potencial de captura de C en la biomasa aérea de *E. guineensis* Jacq., se utilizan ecuaciones alométricas para calcular el volumen de la biomasa en el tallo y hojas, donde el 50% de esta biomasa es carbono, por otro lado, el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) es el aporte por esta biomasa aérea y subterráneas que influyen en la cantidad y almacenes de C en el

suelo. Asimismo, se comparó con agrosistemas de pastizales debido a que en la zona de estudio la ganadería es considerada una importante actividad económica (Ramos-Reyes *et al.*, 2019). Sin embargo, no se tiene registro en relación al potencial de carbono capturado en la biomasa aérea y el suelo. Por su parte, como tratamiento control (testigo) se utilizó a los remanentes de bosque secundario que se encuentran alrededor de la palma de aceite y pastizales, debido a que como se mencionó con anterioridad, entre 1965 y 1996 el territorio tabasqueño perdió gran parte de la superficie arbolada (Vargas-Simón, 2019), conservándose pequeños manchones de selvas, acahuales y arboles aislados los cuales permiten el mantenimiento de diversidad de flora y fauna (Pérez *et al.*, 2005). Estas áreas de bosque secundario (acahuales) se establecen después de la ocurrencia de perturbaciones o del abandono de comunidades de cultivo que reemplazaron a la selva primaria (Vaccaro *et al.*, 2003), lo cual permitió inferir que las especies dentro de estos agrosistemas pueden llegar a cumplir las funciones más cercanas a la selva perennifolia que fue perturbada en la zona de estudio anteriormente. Por lo tanto, ambos agropaisajes se asocian al agrosistema *E.guineensis* Jacq en la región, convirtiéndose en importantes agrosistemas comparativos: específicamente en el potencial de captura de carbono en la biomasa aérea y en el suelo. Por lo que, se vuelve un interés ambiental y agrícola conocer si pudieran ser una alternativa para mitigar el efecto del cambio climático global (CCG).

1.3 Antecedentes

1.3.1 Captura de carbono en la biomasa aérea en palma de aceite

De acuerdo con Pulhin *et al.* (2014), el potencial de secuestro de carbono de la palma de aceite ha sido reconocido desde hace varios años en Filipinas; sin embargo, no había sido evaluada la cantidad de carbono en su biomasa. Esta investigación presenta la cantidad de carbono almacenado en diferentes partes de *Elaeis guineensis* Jacq. y en diferentes edades por el método destructivo, es decir, aprovechamiento total (tallo, hojas, fruta, flores y raíces). Por ello, se evaluó el contenido de carbono en palma de aceite con edades de dos, cinco, seis, siete, ocho y nueve años. Sus resultados indican que, entre las diferentes partes, tallo y frondas almacenan la más alta cantidad de carbono por planta. También argumentan que el contenido de carbono de las hojas de palma aceitera no varía con la edad de la plantación. Asimismo, la determinación de C muestra que una planta de nueve años, en Filipinas puede secuestrar 6.1 Mg C ha^{-1} por año, y con respecto

al almacenamiento de carbono se estimaron alrededor de 55 Mg C ha⁻¹. Por su parte Kotowska *et al.* (2015) en Sumatra Indonesia evaluaron el almacenamiento de carbono en plantaciones de palma aceitera; las edades variaron entre 8 a 15 años, reportan almacenamientos de C en promedio de 50 Mg C ha⁻¹. De acuerdo con el estudio realizado por Ramos-Escalante *et al.* (2018) el estado de Chiapas, México, posee potencial agroclimático y edáfico para cultivar palma de aceite, en la actualidad existen alrededor de 48 mil ha plantadas con esta especie, lo que representa un sumidero de (C) importante. Los autores midieron la biomasa y el C acumulado en plantas de 12 años, con un muestreo similar al de Pulhin *et al.* (2014) con método destructivo, reportando el almacenamiento de 76.18 Mg C ha⁻¹ y tasa media de fijación anual de 6.53 Mg ha⁻¹ (Tabla 1).

Tabla 1. Captura de carbono en *E. guineensis* Jacq. en los compartimentos de biomasa aérea y suelo en diversas partes del mundo. Fuente: Elaboración propia.

País	Periodo de observación	Profundidad observada (cm)	C del Suelo (Mg C ha ⁻¹)	C en Biomasa (Mg ha ⁻¹)	Promedio Total	Suelos	Autor
Bohol, Filipinas	2 - 9 años	_____	_____	55	_____	_____	Pulhin <i>et al.</i> , 2014
Sumatra Indonesia	8 - 15 años	_____	_____	55.7	_____	AC	Kotowska <i>et al.</i> , 2015
México	12 años	_____	_____	76.18	_____	_____	Ramos-Escalante <i>et al.</i> , 2018
Costa Rica	7 años	0-30	73.74	22.68	96.02	AN	Leblanc <i>et al.</i> , 2008
		30-50	103.35	_____	126.03		
Indonesia	25 años	30	51.85	_____	_____	_____	Khasanah <i>et al.</i> , 2015
Brasil	4 años	0-30	33.2	_____	27.5	Oxisol	Frazão <i>et al.</i> , 2013
	8 años		26.6	_____			
	25 años		22.7	_____			
Brasil	23 años	0-30	34.3	_____	_____	_____	Frazão <i>et al.</i> , 2014
	34 años		66.6	_____			
Brasil	AFSp 25 años	0-30	58.2	40.98	99.18	_____	Ramos <i>et al.</i> , 2018
	AFSPp-c 25 años		65.79	50.91	116.70		
Colombia	_____	0-20	18.8	_____	_____	PH	Vásquez-Polo <i>et al.</i> , 2011
Brasil	Palma baja 2.5 años	0-20	46.6	_____	_____	_____	de Carvalho <i>et al.</i> , 2014
		20-50	45.1	_____	_____		
México	4 años	0-60	49	_____	_____	LX	Brindis-Santos <i>et al.</i> , 2018
	8 años	0-60	55.31	_____	_____		
	18 años	0-60	61.59	_____	_____		

AFSp= Sistema agroforestal a base de producción de palma aceitera; AFSp+c=Sistema agroforestal de producción de palma de aceite y cacao. AC= Acrisol, AN= Andosol, PH= Phaeozem, LX= Lixisol.

Por su parte Pulhin *et al.* (2014) en Indonesia, argumentan que la palma de aceite tiene potencial de captura de carbono ligado al potencial de formación de biomasa, y es un cultivo importante en

la mitigación del cambio climático, asimismo, argumentan que la mayor concentración de este elemento es en el fuste, seguido de las ramas y luego las raíces. En Costa Rica, Leblanc *et al.*, (2008) reportaron concentraciones de 10.88 Mg ha⁻¹ de C (49.08%) y 11.8 Mg ha⁻¹ de C (52.0%) en hojas y tallo, respectivamente; con tasa de fijación media anual de C en la biomasa aérea de la palma africana de 3.24 Mg C ha⁻¹, por año; los mismos autores mencionan, que la especie es fijadora de C en la región tropical húmeda de Costa Rica con el almacenamiento en la biomasa aérea total de 22.68 Mg ha⁻¹, estos contenidos de C en la biomasa aérea contrastan por lo reportado por los autores antes mencionados, uno de los factores que pudiera estar influyendo en los contenidos de C en la biomasa aérea es que los autores Pulhin *et al.* (2014) y Ramos-Escalante *et al.* (2018) utilizaron el método destructivo y Leblanc *et al.* (2008) utilizaron un factor de conversión (0.5) lo que puede dar lugar a una estimación del carbono, sin embargo, puede estar sesgado entre 3 y 10% e incluso cuando la aplicación de un factor de (0.48), la conversión de las reservas de carbono en plantaciones de palma de aceite están sobreestimadas 6% en comparación con los contenidos de carbono reportados con el método directo (Kotowska *et al.*, 2015).

1.3.2 Almacenamiento de carbono en el suelo en palma de aceite

Otro reservorio de carbono importante en el planeta es el suelo; contribuye a mitigar los gases de efecto invernadero (GEI) principalmente CO₂ y N₂O, generados mayormente por actividades antrópicas (Etchevers, 2001). Al respecto, Batjes (1996), argumentan que, para diversos grupos de suelo en el mundo, el carbono orgánico del suelo se estima que se encuentra entre el 39-81 % en los primeros 50 cm de la capa del suelo. Asimismo, Rantoa *et al.* (2015) determinaron que los suelos en Sudáfrica, acumulan el 16 % del COS en los horizontes superficiales O y A; disminuyendo al 0.3 % en horizontes con mayor contenido de material mineral (Bt), esta diferencia en los porcentajes de C en los diferentes horizontes genéticos es provocado por el reciclaje constantes de los aportes de restos vegetales en el horizonte superficial lo que conduce a la acumulación de mayores proporciones de residuos orgánicos que en las capas subsuperficiales. De acuerdo con Leblanc *et al.* (2008) en Costa Rica, el potencial de captura de C de *E. guineensis* Jacq. en las profundidades del suelo de 0-30 y 0-50 cm es de 96.02 Mg ha⁻¹ y 102 Mg ha⁻¹, respectivamente. En Indonesia Khasanah *et al.* (2015) evaluaron el C a 30 cm de profundidad en plantaciones de palma aceitera reportando 51.86 Mg C ha⁻¹, los autores argumentan que, estas

cantidades de carbono a través del tiempo se logran por el manejo al cultivo con las llamadas “buenas prácticas” lo que incluye la retención de residuos orgánicos dentro de la plantación, cultivos de cobertura e incluso residuos de la cosecha reintegrados a la plantación, que contribuyen al incremento del contenido de C en el suelo. Por su parte, Frazão *et al.* (2014) en Bahía, Brasil, encontraron que la edad del cultivo de palma aceitera influye en la concentración del carbono en el suelo, reportan que el contenido de carbono orgánico del suelo a una profundidad de 0-30 cm, cuando el cultivo tiene 23 años, el suelo almacena 34.3 Mg ha⁻¹ y con 34 años almacena 66.6 Mg ha⁻¹. De igual manera Frazão *et al.* (2013) evaluaron los cambios en las existencias de C del suelo después 4, 8 y 25 años de la conversión de bosques y pastizales a la producción de palma de aceite en la región amazónica. Los contenidos de carbono del suelo acumulado fueron 32.2, 26.6 y 22.7 Mg ha⁻¹, a los 4, 8 y 25 años de edad respectivamente, a una profundidad de 30 cm de la superficie del suelo. Por otro lado, Ramos *et al.* (2017) evaluaron el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestal (25 años) a base de palma de aceite (AFSp) y un sistema agroforestal a base de palma de aceite y producción de cacao (AFSp+c) en el este de la amazonia, Brasil, las estimaciones de carbono se realizaron en la biomasa sobre el suelo, hojarasca, raíces y en el suelo. Sus resultados indicaron que el ecosistema que mayor C almacenó fue AFSp+c con 116.7 Mg C ha⁻¹, donde el suelo almacenó 65.79 y la biomasa 50.91 de C. El sistema AFSp en total almacenó 99.1 Mg C ha⁻¹, encontrándose en el suelo 58.2 y en la biomasa 40.98 C almacenado en los dos compartimentos. Mientras Vásquez-Polo *et al.* (2011) en Colombia, evaluaron diferentes zonas de clima cálido tropical y el efecto que sobre ellas han tenido las prácticas asociadas a suelos cultivados con *Elaeis guineensis* jacq., los autores presentan valores de 18.8 Mg C ha⁻¹ a 20 cm de profundidad, estas concentraciones se asocian a suelos desarrollados a partir de depósitos aluviales formados por los ríos que descienden de la Sierra Nevada y con contenidos altos de Ca y C orgánicos bajos en el primer horizonte, y fertilidad natural alta. Por su parte de Carvalho *et al.* (2014) reportaron existencias de C altas, del orden de 91.8 Mg ha⁻¹ a los 50 cm de profundidad. Estos mismos autores, indican un alto nivel de acumulación de C en sistemas agroforestales basados en palma de aceite menor a 3 años del orden de 8.3 Mg C ha⁻¹ por año, mencionan que probablemente al establecer el sistema sin quemar los desechos orgánicos, realizar fertilización orgánica y la entrada de residuos de plantas al podar y deshierbar se están acumulando altas cantidades de C en el suelo.

1.3.3 Captura de carbono en biomasa aérea y en el suelo de bosque secundario

El incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y su incidencia en el cambio climático, ha promovido el interés en la fijación biológica de carbono como un medio para reducir dicha concentración (Houghton, 1996; Krankina *et al.*, 1996). En esta fijación los bosques tropicales juegan un papel importante, en función del almacenamiento de grandes cantidades de carbono, pero se carece de su contribución neta en el balance del carbono terrestre. Por su parte, Chacón *et al.* (2007) confirman lo antes mencionado, argumentan que el bosque secundario constituye una alternativa para incrementar la fijación de carbono en función de la producción de biomasa aérea por las diversas especies; en su estudio realizado en Costa Rica, determinaron que la biomasa seca total del bosque secundario fue de $99.9 \pm 15.7 \text{ Mg ha}^{-1}$. Por lo tanto, el C total fijado en el bosque secundario fue de $46.4 \pm 7.1 \text{ Mg ha}^{-1}$, con una tasa de fijación de 3.1 Mg ha^{-1} de C por año. Al separar los diferentes estratos del bosque secundario, los autores mencionan que el C fijado en el mantillo fue de $0.04 \pm 0.01 \text{ Mg ha}^{-1}$, en las herbáceas $0.6 \pm 0.1 \text{ Mg ha}^{-1}$, en las lianas $1.2 \pm 0.2 \text{ Mg ha}^{-1}$, en el sotobosque $2.5 \pm 0.4 \text{ Mg ha}^{-1}$, en los latizales $2.6 \pm 0.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ y en los fustales $39.4 \pm 7.1 \text{ Mg ha}^{-1}$. Los fustales aportaron la mayor fijación de C, representando un 84.9 % del total del C fijado. Los latizales representaron el 5.7 % del total de C fijado. Los autores concluyen que las tasas de fijación de carbono anuales son mayores que las de un bosque maduro para la misma zona; lo anterior confirma que el bosque secundario puede tener potencial como fijador de C. Estudio realizado por Vaccaro *et al.* (2003) en Argentina mencionan que el carbono en la biomasa total alcanzó una tasa media anual de incremento de 7.4 Mg C ha^{-1} por año en el bosque secundario de 19 años; en edades menores que oscilan entre 5 y 6 años la tasa fue alrededor de 1 Mg C ha^{-1} ; a los 10 años el aumento varió entre 1 y 2 Mg C ha^{-1} por año; a los 15 años de edad se acercó a 6 Mg C ha^{-1} por año y la máxima tasa media anual de acumulación de carbono fue 0.62 Mg ha^{-1} por año, lo cual ocurrió a los 12 años. Los autores también mencionan que la densidad aparente (DA) disminuyó con la edad; este comportamiento se debe al recambio que existe en la biomasa aérea, y mediante la caída de hojas, frutos y ramas finas, partes de ella pasan a formar parte del mantillo y tras su fraccionamiento y descomposición, se incorpora al suelo; lo cual podría estar directamente relacionado con el incremento del carbono en el suelo. Por su parte, Aryal *et al.*, (2017)

mencionan que la acumulación constante de los residuos orgánicos de las especies (hojas, flores, ramas, etc.) en un bosque secundario hacen que el horizonte superficial del suelo sea normalmente más rico en nutrientes que los horizontes subyacentes profundos, además tiende a tener densidad aparente menor debido al alto contenido de material orgánico acumulado, en comparación con suelos cultivados; teniendo tasas de acumulación de biomasa menores que los acahuales. Palma-López *et al.* (2015) mencionan que los contenidos de materia orgánica en acahuales son de 0.3 a 5 %; lo que indica que los acahuales son sistemas que tienden a estabilizar el contenido de MO en el suelo

1.3.4 Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y en el suelo en pastizales.

Una gran proporción de materia orgánica del suelo (MOS) es asociado con partículas de arena, limo y arcilla y con micro y macro agregados del suelo a través de diferentes mecanismos (Chacón *et al.*, 2015). En este sentido los pastizales pueden servir como sumideros de C debido a que se encuentran establecidos por varios años en un mismo sitio. De acuerdo con Céspedes *et al.* (2012) un pastizal de *Sorghastrum setosum* y una pradera de *Cynodon nlemfluensis*, pueden acumular C en el suelo a 1 m de profundidad entre 110 y 108 Mg ha⁻¹ respectivamente. Etchevers *et al.* (2001) argumentan que una pradera en la Región Cuicateca en Oaxaca, México almacena 87 Mg C ha⁻¹ a 100 cm de profundidad en el suelo. En este mismo sentido, Flores *et al.* (2016) en un pastizal de *Sorghastrum setosum* encontraron que a 0,1 m de profundidad de 24,35 t ha⁻¹, y a 1 m de 40,25 t ha⁻¹; la DA en estos estratos fue de 1,12 t m³ a 0,1 m y 1,29 t m³ a 1m de profundidad; el contenido de Carbono en la biomasa aérea del pastizal fue de 5,65 t ha⁻¹. Sus conclusiones fueron que el stock de Carbono en primavera en el ecosistema del pastizal es 139,24 t ha⁻¹, donde 95,94 % corresponde a Carbono acumulado en suelo y el resto a Carbono acumulado en la biomasa aérea del pastizal.

De acuerdo con Yamallel *et al.* (2014) los pastizales abandonados en un periodo de 10, 20 y 30 años almacenan C en la biomasa aérea del orden de 8.03, 7.33 y 4.13 Mg ha⁻¹ respectivamente, y argumentan que la potencial captura disminuye con el aumento del abandono del sistema. A su vez, Castro *et al.* (2012) comparan, la productividad en materia seca y captura de carbono, entre un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte del

departamento de Casanare. En el lote experimental de cada finca se sembró una mezcla de cuatro especies de pastos, de los cuales *Brachiaria brizantha* fue la que tuvo un desarrollo exitoso en las cinco fincas. A los cinco meses después de la renovación de pastos en los lotes experimentales se obtuvo una productividad en materia seca entre 6,3 y 14,9 tMS/ha, y en captura de carbono entre 2,7 y 6,4 tCOT/ha; mientras que en los lotes tradicionales estuvo entre 4 y 5 tMS/ha, y en captura de carbono entre 1,7 y 2,9 Mg C ha⁻¹. A los 20 meses en los lotes experimentales se obtuvo una productividad en materia seca entre 12 y 13,7 tMS/ha, y en captura de carbono entre 4,1 y 4,5 Mg C ha⁻¹; mientras que en los lotes tradicionales estuvo entre 4,4 y 6,5 tMS/ha, y en captura de carbono entre 1,4 y 2,1 Mg C ha⁻¹. Indicando que la renovación de praderas con pastos adecuados y el pastoreo de rotación favorecen la producción en materia seca y la captura de carbono.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

1.4 Objetivo General

Determinar el potencial de almacenamiento de carbono de los compartimentos: suelo y biomasa vegetal, en tres tipos de vegetación de origen antrópico (agrosistemas de palma de aceite, pastizales y acahuales) en la zona Sierra de Tabasco.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Cartografiar y clasificar los suelos a escala semidetallada 1:50000 en la zona Sierra de Tabasco.
- Determinar el almacenamiento de carbono en el componente suelo de tres agrosistemas en la zona Sierra de Tabasco.
- Estimar la cantidad de carbono en la biomasa aérea de tres agrosistemas de vegetación de origen antrópico en la zona Sierra de Tabasco.

El documento de tesis está estructurado en los siguientes capítulos. Capítulo 1: Introducción general, a) se explica el planteamiento del problema, b) la justificación del ensayo experimental, c) los objetivos de investigación el general y específicos y d) los antecedentes a nivel mundial de captura de carbono en los compartimentos de suelo y biomasa aérea de los agrosistemas de investigación.

En el capítulo 2, se presenta el panorama general de la investigación e incluye información sobre: a) Causas del incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, b) importancia de los agrosistemas tropicales como almacenamiento de carbono, c) ciclo global del carbono, d) los principales sumideros naturales de carbono (C), e) almacenamiento de carbono orgánico en suelo, f) fracciones del carbono orgánico en el suelo y g) potencial de la captura de carbono en la parte arbórea.

En el capítulo 3, se aborda la relación de los paisajes geomorfológicos con las unidades de suelo en la zona de estudio, lo cual permitió caracterizar las propiedades físicas y químicas de los suelos en zonas de planicies y terrazas. Así mismo, el muestro de C y N en los agrosistemas

(palma de aceite, pastizales y bosques secundarios) y se evaluaron estas variables en condiciones ambientales similares. Este capítulo ha sido publicado en la revista del Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Brindis-Santos *et al.* (2020).

En el capítulo 4, se analiza el almacenamiento de carbono, nitrógeno y la relación C/N, y otras propiedades edáficas indicadoras de acidez y compactación del suelo en los tres agrosistemas considerados. El artículo resultado de este capítulo se enviará a la revista Geoderma Regional.

El capítulo 5, aborda el estudio de la biomasa aérea total (BAT) y la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea (tallos y hojas) de los agrosistemas considerados, por medio de ecuaciones alométricas. El artículo resultado de este capítulo se envió a la revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios.

Por último, en el capítulo 6, se presenta una discusión general, sobre los hallazgos encontrados en esta investigación.

CAPITULO 2.

MARCO TEÓRICO

El siguiente capítulo describe conceptualmente la importancia del almacenamiento de carbono (C) en los principales sumideros naturales del dióxido de carbono, asimismo, sirvió para relacionar las funciones ambientales de la biomasa aérea en los ecosistemas, sistemas agroforestales y agrosistemas agrícolas, y como esa materia seca posteriormente se convierte parcialmente en materia orgánica del suelo. Por ello, se abordaron subtemas relacionados con almacenes y flujos de C en los compartimentos de biomasa aérea y suelo.

2.1 El ciclo global del carbono

El ciclo global de carbono (C) está controlado por factores biológicos y físicos que mueven al C entre los principales reservorios de la Tierra: atmósfera, la corteza terrestre, los suelos, los cuerpos de agua, y en los seres vivos (Orellana-Rivadeneira *et al.*, 2012). Debido a que el C es uno de los componentes esenciales de toda la vida en la Tierra, los procesos enzimáticos actúan continuamente sobre este elemento en la mayoría de los depósitos donde existe (Schuur *et al.*, 2016). De acuerdo con Ciesla (1996), el ciclo del C es el movimiento de éstos, en sus distintas formas, entre la superficie terrestre, su interior y la atmósfera, los mecanismos principales del intercambio de carbono son la fotosíntesis, la respiración y la oxidación (Figura 1). El C es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno, e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida (Jaramillo, 2004).

De acuerdo con la SEMARNAT (2009), el ciclo del carbono se lleva a cabo en dos fases, la geológica y la biológica. En la primera fase es mucho más lento; debido a que el bióxido de carbono que está libre en la atmósfera se disuelve en el océano. Ahí se transforma en bicarbonato y se combina con el calcio para formar grandes acumulaciones de roca caliza (Llamas, 2016). De esta forma, el carbono se integra a la corteza terrestre y constituye la mayor reserva de carbono en todo el ciclo (Figuroa *et al.*, 2007). Justamente, por este proceso, el ciclo es mucho más lento debido a que tiene que pasar por las actividades volcánicas o la disolución de las rocas calizas

(ejemplo, por el agua de lluvia), para regresar el carbono a la atmósfera en forma de gas, es decir, como dióxido de carbono (Martín-Chivelet, 2010).

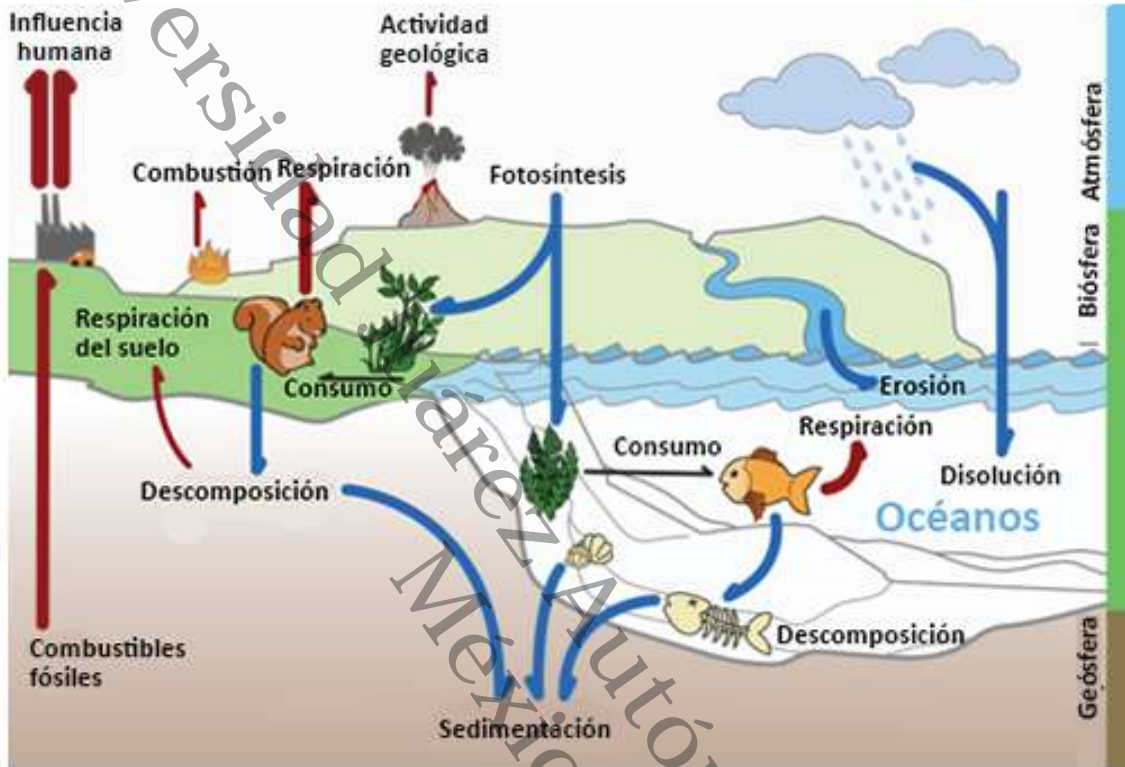


Figura 1. El ciclo del carbono. El reciclaje del dióxido de carbono en la fotosíntesis y la respiración celular son los principales componentes del ciclo del carbono. El carbono también es devuelto a la atmósfera con la quema de combustible fósiles y la descomposición de materia orgánica. Recuperado de: <https://www.ck12.org/book/ck-12-conceptos-de-ciencias-de-la-vida-grados-6-8-en-espa%C3%B1ol/section/12.21/>.

Por su parte, en la fase biológica las plantas tienen la capacidad de absorber y fijar el bióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y, mediante la fotosíntesis, asimilan el carbono inorgánico para posteriormente construir biomasa (carbono orgánico) estructurado en tallos, hojas, raíces, flores, frutos y semillas (Arellano y de las Rivas, 2006). No obstante, 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, por lo tanto, esta fase es más rápida (Gallardo, 2017).

2.2 Los sumideros naturales de CO₂

Los sistemas ecológicos de la tierra, son fundamentales en relación a los sumideros de carbono, debido que por medio de estos el carbono queda retenido en la biomasa viva o cantidad de materia vegetal, en la materia orgánica de descomposición y el suelo (Manson, 2008). De acuerdo con Cuenca (2017), los árboles y las plantas verdes, a través de la actividad clorofílica, convierten el anhídrido carbónico en energía química, eliminándola de la atmósfera y vertiendo a ella moléculas de oxígeno como material de desecho. Por ello, en el sector forestal y agrícola las opciones son diversas; pues los bosques, los cultivos y los suelos son depósitos, fuentes y sumideros de carbono (Pedroni, 1999). Por su parte Palm *et al.* (2014) mencionan que la agricultura de conservación, la no labranza, las rotaciones de los cultivos, los cultivos de cobertura y abonos verdes, la aplicación de compost y abonos orgánicos, así como la conversión de tierras agrícolas a tierras forestales y el cultivo de especies para biocombustibles son alternativas para aumentar los sumideros de C (Dumanski; 2015; Sithole, *et al.*, 2016; Powlson *et al.*, 2016).

El carbono del mundo se almacena en cinco grandes compartimentos: 1) reservas geológicas; 2) océanos; 3) atmósfera; 4) suelos y 5) la biomasa vegetal. De manera consecutiva, los océanos son el mayor reservorio de C, este concentra 38, 000 petagramos (Pg) de C; la geológica almacena 4,000 Pg de C; la vegetación terrestre captura aproximadamente 850 Pg; el segundo reservorio más importante es el suelo; se estima que almacena 1,500 Pg en los primeros 100 cm de la profundidad, mientras tanto, la atmósfera concentra 750 Pg (Gallardo y Merino, 2007).

2.3 Almacenamiento de carbono en el suelo

Los suelos son el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas terrestres y a su vez la mayor fuente de CO₂ atmosférico, el cual es producido mediante un proceso denominado respiración del suelo (Ramírez y Moreno, 2008). Lal (2004) menciona que el conjunto global de carbono del suelo es de 2,500 gigatoneladas (Gt) incluye aproximadamente 1,550 Gt de carbono orgánico del suelo (COS) y 950 Gt de carbono inorgánico del suelo. El C almacenado en el suelo es 3.3 veces mayor al reservorio atmosférico 760 Gt y 4.5 veces al tamaño que almacena la biótica 560 Gt

(Figura 2). Esta capacidad que tiene el suelo de captar dióxido de carbono atmosférico podría explotarse para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero (Watson *et al.*, 2000; Kumar *et al.*, 2012). En particular el C, cuyo principal mecanismo de almacenamiento ocurre mediante la protección física de la materia orgánica en la estructura del suelo (Hernández *et al.*, 2011). Al respecto Six *et al.* (2002) mencionan que la materia orgánica del suelo puede ser: (1) estabilizada físicamente, o protegida de la descomposición a través de la microagregación, 2) asociada íntimamente con partículas de limo y arcilla, y 3) puede estabilizarse bioquímicamente mediante la formación de compuestos de la materia orgánica (MOS) recalcitrantes.

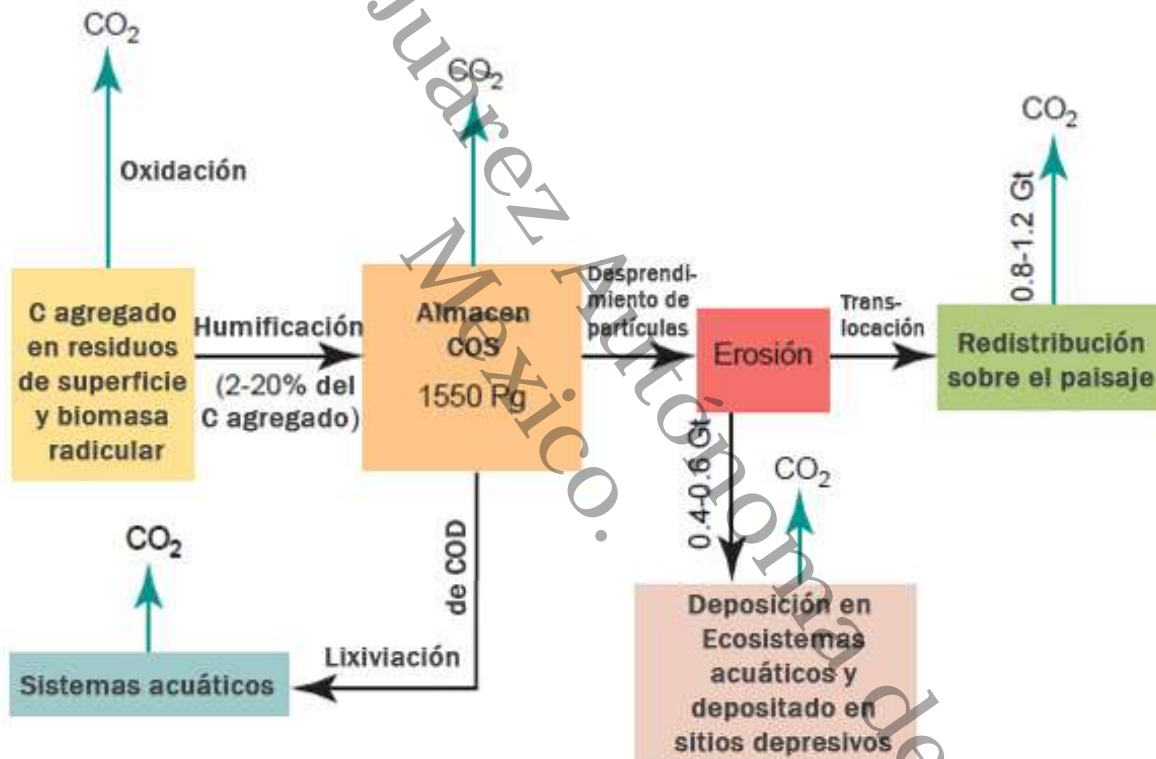


Figura 2. Proceso que afecta la dinámica del carbono orgánico del suelo (Fuente: Lal, 2004).

El carbono en el suelo es uno de los principales componentes de la materia orgánica que, a su vez, desempeña un papel fundamental en el ciclo global del carbono (Orellana-Rivadeneira *et al.*, 2012). Ahora, el contenido de carbono en el suelo obedece a sus características y al equilibrio entre las tasas de entrada de carbono orgánico de origen vegetal y animal, y a las de salida resultante del metabolismo microbiano que genera el CO_2 (Burbano-Urjuela *et al.*, 2018). Mientras que Docampo (2010) menciona que las características de los suelos son diversas, por lo

que hay que tomarlas en cuenta en los balances que determinan las cantidades de carbono orgánico en el suelo, sumado a ellos la dinámica del clima, microorganismos y las prácticas de manejo adoptadas (Luo *et al.*, 2017). Al respecto Paz (2012) menciona que en suelos agrícolas, el contenido de carbono orgánico depende más, del tipo del cultivo, la rotación y las prácticas de manejo del suelo y agua. Hobley *et al.* (2015) argumentan que el almacenamiento del carbono orgánico del suelo varía en diferentes regiones y a diferentes profundidades debido a factores locales que influyen en la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS).

2.4 Fracciones del carbono orgánico en el suelo

El carbono orgánico del suelo se puede separar en dos agrupaciones lábiles (activas) y recalcitrantes (pasivas) de acuerdo con el tiempo que se tarde en reciclarse (Parton *et al.*, 1987; Ferras de Almeida *et al.*, 2019). El C lábil se caracteriza por una rápida mineralización, consiste principalmente de materia orgánica fresca y es sensible al manejo de la tierra y a las condiciones ambientales (Gulde *et al.*, 2008). Zak *et al.* (1994) mencionan que el carbono orgánico lábil en el suelo, es la fracción de la MOS que alimenta a los microorganismos del suelo y, por lo tanto, influye enormemente en los ciclos de nutrientes y en muchas propiedades biológicas relacionadas con el suelo. Por lo tanto, los compuestos orgánicos con estructuras más simples como los polisacáridos, los lípidos y las proteínas, son más propensos a la descomposición y a estimular la actividad biológica en comparación con otros compuestos orgánicos que comprenden la MOS (Wang *et al.*, 2015), por lo que son más sensibles y dinámicos en la descomposición de la MOS a través del tiempo (da Silva *et al.*, 2017).

En contraste, los almacenes de carbono recalcitrante (COR) tardan más en descomponerse y no están disponibles para los microorganismos (Lal *et al.*, 2015). Este COR está compuesto por sustancias húmicas (SU), ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF) (Stevenson, 1994). Las sustancias húmicas representan entre el 60 y 80% del carbono orgánico total con la concentración más alta en las SU, seguido de AF o AH (Almeida *et al.*, 2014). De estos compuestos, las SU presentan la mayor concentración en el suelo y una fuerte resistencia contra la degradación

microbiana debido a mayores proporciones de funciones aromáticas y enlaces a componentes minerales (Stevenson, 1994). De acuerdo con Lal *et al.* (2004) y Almeida *et al.* (2014), el carbono orgánico total (COT) está representado por la suma de las reservas lábiles y recalcitrantes, que se caracterizan por ser una mezcla heterogénea de materiales orgánicos en el suelo, compuestos orgánicos complejos, residuos orgánicos frescos y carbohidratos.

2.5 Vegetación natural como almacén de carbono

Los bosques y las selvas tienen un papel importante en el ciclo global del carbono y son valorados globalmente por los servicios que brindan a la sociedad. Los bosques son capaces de almacenar grandes cantidades de carbono. Esto se debe a que los árboles absorben carbono de la atmósfera durante la fotosíntesis y luego lo usan para construir nuevas hojas, brotes y raíces (Lussaert *et al.*, 2008; Pan *et al.*, 2011). Los árboles absorben dióxido de carbono de la atmósfera, y la madera puede ser un sustituto de los combustibles fósiles y materiales intensivos en carbono como el hormigón y el acero. En las últimas décadas, los bosques del mundo han absorbido hasta un 30% (2 petagramos de carbono por año; (Pg C año⁻¹)) de las emisiones anuales antropogénicas mundiales de CO₂, aproximadamente la misma cantidad que los océanos (Ballassen y Lussaert, 2014). El carbono (C) de los bosques del mundo se ha estimado 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 se encuentra en la madera muerta (8%), y finalmente, 43 Pg (5%) en el mantillo (Pan *et al.*, 2011). Geográficamente los bosques tropicales son los que almacenan una mayor cantidad de C en comparación con los bosques boreales y bosques templados en un estimado de 193–229 Pg (55%) (Baccini *et al.*, 2012).

Martínez y Leyva (2014), mencionan que del 42 al 50% de la biomasa seca de un árbol es carbono. En términos porcentuales el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea representando entre 55 al 77 % del total luego están las ramas de 5 a 37 % seguido por las hojas entre 1 a 15% y finalmente la corteza del fuste entre 5 a 16% respectivamente (Pardé 1980; Pedrasa 1989). La contribución porcentual de los diferentes componentes (fuste, corteza, ramas, hojas y raíces) en la biomasa total de un árbol varía considerablemente dependiendo de la especie, edad, sitio y tratamiento silvicultural (Pardé, 1980). Orrego y del Valle (2001)

manifiestan que en los ecosistemas forestales se pueden identificar diferentes compartimientos en los cuales se almacena el carbono. En términos generales se habla de la biomasa aérea, necromasa, biomasa subterránea, carbono en el suelo, productos derivados de la madera en el caso de aprovechamiento forestal y otros productos no maderables.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Literatura citada

- Aryal D.R., De Jong B.H.J., Mendoza-Vega J., Ochoa-Gaona S., y Esparza-Olguín L. (2017). Soil organic carbon stocks and soil respiration in tropical secondary Forests in Southern Mexico. In: Field D.J., Morgan C.L.S., McBratney A.B. (eds) Global Soil security. progress in soil science. Springer, Cham
- Almeida, R.F., Machado, H.A., Martins, F.P., de Sousa Queiroz, I.D., Teixeira, W.G., Mikhael, J.E.R., y Borges, E.N. (2014). Correlação do tamanho e da distribuição dos agregados em latossolos amarelo da região do Triângulo Mineiro com diferentes ambientes. *Bioscience Journal*, 30(5).
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A., y Lana, M.A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 869-890.
- Arias-Arias, Mata-García, B., González-Santiago, M.V., y Aguilar-Ávila, J., (2013). Palma de aceite: Aprendizajes compartidos en Veracruz, México. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México: Centro Interdisciplinario de Investigación y Servicios para el Medio Rural (CIISMER). 170 p.
- Ávila, L.E.R., y Ávila, A.R. (2015). Los agrocombustibles y el crecimiento verde en Chiapas, México (the agrofuels and green development in chiapas, mexico). *Revista GeoNordeste*, (1), 249-273.
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European journal of soil science*, 47(2), 151-163.
- Baccini, A., Goetz, S.J., Walker, W.S., Laporte, N.T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S.A., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta, S. y Houghton, R.A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change* 2, 182–185.
- Bellassen, V., y Luysaert, S. (2014). Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature News*, 506(7487), 153.

- Barton Bray D. y Merino Pérez L. (2004). La Experiencia de las comunidades forestales en México: venticinco años de silvicultura y construcción de empresas forestales comunitarias. México: Instituto Nacional de Ecología. 263 p.
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev.Cienc. Agr.* 35(1): 82-96.
- Brindis-Santos, A.I., Palma-López, D.J, Zavala-Cruz, J., Mata-Zayas, E.E., López-Bustamante, Y.I. (2020), Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en Planicies y Terrazas de Tabasco, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 72(1), 1-17.
- Castro, E.C., Lozano, Á.M.B., Barrera, J.E.E., y Martínez, A.P. (2012). Productividad en materia seca y captura de carbono en un sistema silvopastoril y un sistema tradicional en cinco fincas ganaderas de piedemonte en el departamento de Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, (24), 51-57.
- Ciesla, W.M. (1996). Cambio climático bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto (Vol. 126) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO. 131 p.
- Chacón, P., Leblanc, H.A., y Russo, R.O. (2007). Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical*, 3(1), 1-11.
- Chacón, P., Lorenz, K., Lal, R., Calhoun, F.G., y Fausey, N.R. (2015). Association of soil organic carbon with physically separated soil fractions in different land uses of Costa Rica. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(5), 448-459.
- da Silva Oliveira, D.M., Paustian, K., Cotrufo, M.F., Fiallos, A.R., Cerqueira, A.G., y Cerri, C. E.P. (2017). Assessing labile organic carbon in soils undergoing land use change in Brazil: A comparison of approaches. *Ecological indicators*, 72, 411-419.
- De Jong, B.H.J., (2001). Cambio de uso de suelo y flujos de carbono en Los Altos de Chiapas, México. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile* (Vol. 18).

- de Carvalho, W.R., Vasconcelos, S.S., Kato, O.R., Capela, C.J.B., y Castellani, D.C. (2014). Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. *Agroforestry systems*, 88(2), 357-368.
- 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.
- Docampo, R. (2010). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. Serie Actividades de Difusión N° 687. Las Brujas:INIA -Estación Experimental "Wilson Ferreira Aldunate". 81 - 88p.
- Dumanski, J., (2015). Evolving concepts and opportunities in soil conservation. *International Soil and Water Conservation Research*, 3, 1-14.
- Etchevers, B. J., (2001). Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In: Memorias del simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales , Valdivia, Chile (Vol. 18).
- Figueroa, M.E.C., Redondo, S.G., Luque, M.T.P., Fernández, F.M., Mateos, E.N., Vecino, I.B., Castillo, J.M.S., Rubio, A.E.C., Miquel, D.M., y Suárez-Inclán, L.M. (2007). Los sumideros naturales de CO₂: una estrategia sostenible entre el cambio climático y el Protocolo de Kyoto desde las perspectivas urbana y territorial: Universidad de Sevilla, 212 p.
- Ferraz de Almeida, R., Rodrigues Mikhael, J. E., Oliveira Franco, F., Santana, F., Monique, L., y Wendling, B. (2019). Measuring the labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in forested and agricultural soils: A study under tropical conditions. *Forests*, 10 (7), 544.
- Forster, P., V., Ramaswamy, P., Artaxo, T., Berntsen, R., Betts, D.W., Fahey, J., Haywood, J., Lean, D.C., Lowe, G., Myhre, J., Nganga, R., Prinn, G., Raga, M., Schulz y R. Van Dorland. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: *Climate Change 2007: The physical science basis. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* In: Solomon,

S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter2-1.pdf>

Frazão, L.A., Paustian, K., Pellerino, C.C.E., y Cerri, C.C. (2014). Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 62, 1-7.

Frazão, L.A., Paustian, K., Pellegrino C.C. E., y Cerri, C.C. (2013). Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *Gcb Bioenergy*, 5(4), 384-390.

Flores, F.C., Bernardis, A., Fernández, J., Gobbi, J., y Roig, C. (2016). Stock de carbono en un pastizal de *Sorghastrum setosum* (Griseb.) Hitchc en la Provincia de Chaco, Argentina. *Agrotecnia*, (19), 3-7.

Gallardo, L.J.F. (2017). La materia orgánica del suelo: residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco Estado de México. 423 p.

Gallardo, J. F., Merino, A. (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.

Gómez-Díaz, J.D., Etchevers-Barra, J.D., Monterrosos-Rivas, A.I., Campo-Alvez, J., Tinoco-Rueda, J.A., (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente ,17, 261-272.

Gulde, S., Chung, H., Amelung, W., Chang, C., y Six, J. (2008). Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 605-612.

Hernández, A., Marentes, F.L., Vargas, D., Ríos, H., y Padrón, F., (2008). Características de los suelos y sus reservas de carbono en la finca la Colmena de Universidad Cienfuegos, Cuba. *Cultivos Tropicales*, 29, 27-34.

- Henson, I. E. (2004). Modelling carbon sequestration and emissions related to oil palm cultivation and associated land use change in Malaysia. Kuala Lumpur: Malaysian Palm Oil Board. 50 p.
- Houghton, R.A. (1996). Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio* 25: 267-272.
- Hobley, E., Wilson, B., Wilkie, A., Gray, J., y Koen, T. (2015). Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. *Plant and Soil*, 390 (1-2), 111-127.
- Hungate, B.A., Barbier, E.B., Ando, A.W., Marks, S.P., Reich, P.B., van Gestel, N., Tilman, D., Knopns, J.M.H., Hooper, D.U., Butterfield, B.J., y Cardinale, B.J. (2017). The economic value of grassland species for carbon storage. *Science advances*, 3(4), e1601880.
- Isaac-Márquez, R., Valladares, J.L.S., Spencer, A.E., Arcipreste, M.E.A., Aguilar, M.A.A., Márquez, A.P.I., y González, M.C.S. (2016). Impactos sociales y ambientales de la palma de aceite: perspectiva de los Campesinos en Campeche, Mexico. *Journal of Latin American Geography*, 15(2), 123-146.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2001). Climate change 2001: the scientific basis. En: Houghton J.T, Ding Y., Griggs D.J., Noguier M., van der Linder P.J., Dai X., Mashell K., Johnson C.A., (Eds). Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, RU., 881 pp.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007. Mitigation of climate change. Intergovernmental panel of climate change. Special report. Cambridge University Press, Cambridge, USA (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>).
- IPCC. (2014). Climate change 2014: Mitigation of climate change. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, J.C., editors. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge,

United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press. Recuperado de: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3>.

- IPCC. (2018). Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörrther, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (Eds) Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5°C, informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. (. 1-26 p.
- Jaramillo, V.J. (2004). El ciclo global del carbono. *Cambio climático: una visión desde México*, 77.
- Kotowska, M.M., Leuschner, C., Triadiati, T., Meriem, S., y Hertel, D. (2015). Quantifying above- and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of S umatra (I ndonesia). *Global Change Biology*,21(10), 3620-3634.
- Kumar, S., Lal, R., y Liu, D. (2012). A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock. *Geoderma*, 189, 627-634.
- Kumar, M.K., Pinnamaneni, R., Lakshmi, T.V., y Suresh, K. (2017). Carbon sequestration potential in a ten-year-old oil palm under irrigated conditions. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(8), 1339-1343.
- Krankina, O.N., Harmon, M.E., y Winjum, K. (1996). Carbon storage and sequestration in Russian Forest Sector. *Ambio* 25: 284-288.
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304 (5677), 1623-1627.
- Lal, R., Negassa, W., y Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 79-86.

- Leblanc, H., Russo, R., Cueva, J.J., y Subía, E. (2006). Fijación de carbono en palma aceitera en la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Trop*, 2, 143-148.
- Leblanc, H.A., y Russo, R.O. (2008). Carbon sequestration in an oil palm crop system (*Elaeis guineensis*) in the Caribbean Lowlands of Costa Rica. In *Proc. Fla. State Hort. Soc*(Vol. 121, pp. 52-54).
- López, L.J.C. (2017). Acuerdos de París y calentamiento global: Aumentar los sumideros de carbono. *Revista de Derecho, Empresa y Sociedad (REDS)*, (11), 127-150.
- Luo, Z., Feng, W., Luo, Y., Baldock, J., y Wang, E. (2017). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. *Global Change Biology*, 23(10), 4430-4439.
- Luyssaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., y Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455 (7210), 213.
- Llamas Moya, B., (2016). Captura y almacenamiento de CO₂: Criterios y metodología para evaluar la idoneidad de una estructura geológica como almacén de CO₂: Universidad de Huelva, 265 p.
- Martín-Chivelet, C.J. (2010). Ciclo del carbono y clima: la perspectiva geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18(1), 33-46.
- Melillo, J.M., Lu, X., Kicklighter, D.W., Reilly, J. M., Cai, Y., y Sokolov, A.P. (2016). Protected areas' role in climate-change mitigation. *Ambio* ,45(2), 133-145.
- Orellana-Rivadeneira, G., Sandoval-Solís, M.L., Linares-Fleites, G., García-Calderón, N.E. y Tamariz-Flores, J.V. (2012). Descripción de la dinámica de carbono en suelos forestales mediante un modelo de reservorios: Avances en ciencias e ingeniería, 1, 123-135.
- Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., y Grace, P., (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview *Agriculture. Ecosystems & Environment*, 187, 87-105.

- Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Martínez Sebastián, G., Zavala-Cruz, J., y Lagunés-Espinoza, L. D. C. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 2(5), 163-172.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., y Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. y Ojima, D.S. (1987). Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173–1179.
- Pedroni, L. (1999). Implementación conjunta y desarrollo limpio: antecedentes a nivel mundial: Costa Rica. CATIE. 12 p.
- Pérez, L.A, Sousa, S.M., Hanan, A.M., Chiang, F., y Tenorio, P. (2005). Vegetación terrestre. Cap. 4: 65-110. (eds) biodiversidad del estado de Tabasco. UNAM- Conabio, México. 370 p.
- Powlson, D.S., Stirling, C.M., Thierfelder, C., White, R.P., y Jat, M.L., (2016). Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems *Agriculture: Ecosystems & Environment*, 220, 164-174.
- Pulhin, F.B., Lasco, R.D., y Urquiola, J.P. (2018). Carbon sequestration potential of oil palm in Bohol, Philippines. *Ecosystems and Development Journal*, 4(2).
- Prasad, P. V., Bheemanahalli, R., y Jagadish, S. K. (2017). Field crops and the fear of heat stress-opportunities, challenges and future directions. *Field Crops Research*, 200, 114-121.
- Prentice, I. C., G. D. Farquhar, M. J. R. Fasham, M. Goulden, M. Heimann, V. J. Jaramillo, H. S. Khashgi, C. Le Quéré, R. J. Scholes, y D. W. R. Wallace. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *In: Houghton, J. T. (ed.). Climate change: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge and New York, USA. pp: 183-237.*

- Pretty, J.N. (2002). Tierra y agricultura: de la UNCED, Río de Janeiro 1992 a la CMDS, Johannesburgo 2002: un compendio de las recientes iniciativas sobre desarrollo sostenible en la agricultura y el manejo de tierras. . Food & Agriculture Org.
- Quintero-Méndez, M. A., y Jerez-Rico, M. (2017). Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations. *Forest-Biogeosciences and Forestry*, *10*(2), 430.
- Ramos-Escalante, G., Ley de-Coss, A., Arce-Espino, C., Escobar-España, J. C., Raj-Aryal, D., Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., y Guerra-Medina, C.E. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, *52*(5), 671-683.
- Ramos-Reyes, R. (2019). Cambio de uso del suelo. En: La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado. Vol. III. CONABIO, México, pp. 21-28.
- Ramírez, A.A.P y Moreno, F.H.H. (2008). Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *61*(1), 4381-4393.
- Ramos, H.M.N., Vasconcelos, S.S., Kato, O.R., y Castellani, D.C. (2018). Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. *Agroforestry Systems*, 1-17.
- Rantoo, N.R., van Huyssteen, C.W., y du Preez, C. C. (2015). Organic carbon content in the soil master horizons of South Africa. *Vadose Zone Journal*, *14*(3).
- Robert, M., (2002). Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. ISBN: 92-5-304690-2. 68 p.
- Salgado-Velázquez, S., Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Córdova-Sánchez, S., y Rincón-Ramírez, J.A. (2017). Clasificación de los suelos por fertilidad de la subregión ríos de Tabasco, México. *AGROProductividad*, *10*(12), 9-16.

- Salgado, G.M., Gama-Rodrigues, E.F., Vicente, L.C., Gama-Rodrigues, A.C., Aleixo, S., y Marques, J.R.B. (2019). Stable carbon in soils under rubber tree (*Hevea brasiliensis*) agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *SN Applied Sciences*, 1(7), 790
- Segura-Caustrita, M.A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C.A., Gutiérrez-Castorena, Ma.del C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23, (1) 21-28.
- Sánchez-Hernández, R., Ramos-Reyes, R., Geissen, V., Mendoza-Palacios, J.de 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 tropico mexicano: *Terra Latinoamericana*, 29, 211-219.
- Sánchez-Munguía, A., (2004). Uso del suelo agropecuario y deforestación en Tabasco 1950-2000: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División de Ciencias Biológicas. 122 p.
- SEMARNAT. (2009). Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. DF.
- Sithole, N.J., Magwaza, L.S., Mafongoya, P.L., (2016). Conservation agriculture and its impact on soil quality and maize yield: A South African perspective: *Soil and Tillage Research*, 162, 55-67.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., y Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155-176.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., editors. (2007). *Climate change 2007- The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. New York: Cambridge University Press.
- Somarriba, E., Andrade, H.J., Segura, M., y Villalobos, M. (2008). ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas en Costa Rica?. Centro Agronomico Tropical de Investigacion y Enseñanza, Turrialba (Costa Rica).

- Smith, D.R., Townsend, T.J., Choy, A.W., Hardy, I.C., y Sjögersten, S. (2012). Short-term soil carbon sink potential of oil palm plantations. *GCB bioenergy*, 4(5), 588-596.
- Stone, D.A., Allen, M.R., Stott, P.A., Pall, P., Min, S.K., Nozawa, T., y Yukimoto, S. (2009), The detection and attribution of human influence on climate. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 1-16.
- Schuur, E.A.G., Trumbore, S.E., Druffel, E.R.M., Southon, J.R., Steinhof, A., Taylor, R.E., y Turnbull, J.C. (2016), Radiocarbon and the global carbon cycle. En Schuur, A.G.E., Druffel, E., Trumbore, E.S. (Eds), *Radiocarbon and climate change: mechanisms, applications and laboratory techniques*: Switzerland, Springer, 1-19.
- Stevenson, F.J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*, 2nd.; John Wiley y Sons (eds): New York, NY, USA; p. 496.
- UCS. (2019). Union of concerned scientists. Disponible en: <https://www.ucsusa.org/global-warming/science-and-impacts/science/CO2-and-global-warming-faq.html#bf-toc-1>.
- Wiesmeier, M., Munro, S., Barthold, F., Steffens, M., Schad, P., y Kögel-Knabner, I. (2015). Carbon storage capacity of semi-arid grassland soils and sequestration potentials in northern China. *Global Change Biology*, 21(10), 3836-3845.
- Watson, R.T., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., y Dokken, D.J. (2000). *Land use, land-use change and forestry: a special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. 388 p.
- Wang, J.J., Dodla, S.K., y DeLaune, R.D. (2015). Characteristics and functions of labile organic carbon in coastal wetland soils of the Mississippi River Deltaic Plain. *Labile organic matter chemical compositions, function, and significance in soil and the environment*, (62), 315-336.
- Vaccaro, S., Arturi, M. F., Goya, J. F., Frangi, J. L., y Piccolo, G. (2003). Almacenaje de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*, 28(9), 521-527.

- van Noordwijk, M., Ningsih, H., y Rahayu, S. (2015). Carbon neutral? No change in mineral soil carbon stock under oil palm plantations derived from forest or non-forest in Indonesia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 211, 195-206.
- Vargas-Simón, G. (2019). Resumen ejecutivo. Factores de presión. En: La biodiversidad en Tbasco. Estudio de Estado. Vol. III. CONABIO, México pp. 17-19.
- Vásquez-Polo, J.R., Macías-Vázquez, F., y Menjivar-Flores, J.C. (2011). Some forms of organic carbon in soil with different uses in the Department of Magdalena (Colombia). *Acta Agronómica*, 60(4), 369-379.
- Vega, G.C. (2007). Agrocombustibles: las amenazas del imperialismo verde. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 111-152.
- Yamallel, J.I.Y., Pérez, J.J., Rodríguez, E.A., Calderón, O.A.A., Tagle, M.A.G., y Garza, E. J.T. (2014). Dinámica de la Captura de Carbono en Pastizales Abandonados del Noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(1), 113-121.
- Zak, D.R., Tilman, D., Parmenter, R.R., Rice, C.W., Fisher, F.M., Vose, J., y Martin, C.W. (1994). Plant production and soil microorganisms in late-successional ecosystems: A continental-scale study. *Ecology*, 75(8), 2333.

Ciudad de México, 30 de Julio, 2019

A QUIEN PUEDA INTERESAR

En mi calidad de editor en jefe del *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, me complace hacer constar que el manuscrito intitulado ***“Influencia de los Ambientes Geomorfológicos para la clasificación de suelos en ecosistemas y agrosistemas de la región Sierra de Tabasco, México”***, enviado a esta revista por Brindis-Santos, A.I., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Mata-Zayas, E.E. y López-Bustamante, Y.I., ha sido aceptado para su publicación en nuestra revista tras su revisión por dos árbitros expertos independientes y un editor a cargo.

Dicho manuscrito será publicado a la mayor brevedad posible dentro de uno de nuestros números.

Atentamente,


Dr. Antoni Camprubí

Editor en jefe
Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

CAPITULO 3

PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS EN PLANICIES Y TERRAZAS DE TABASCO, MÉXICO.

Titulo condensado: Ambientes geomorfológicos y suelos en Tabasco.

Alfredo Isaac Brindis-Santos. Facultad Maya de Estudios Agropecuarios. Universidad Autónoma de Chiapas. Carretera Catazajá-Palenque Km. 4. C.P. 29980, Catazajá, Chiapas, México.

David Jesús Palma-López. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N, C.P. 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México. dapalma@colpos.mx

Joel Zavala-Cruz. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N, C.P. 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México.

Ena Edith Mata-Zayas. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km.0.5 S/N, entronque a Bosques de Saloya. C.P. 86150, Villahermosa, Tabasco, México.

Yareni Itzel López-Bustamante. División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km.0.5 S/N, entronque a Bosques de Saloya. C.P. 86150, Villahermosa, Tabasco, México.

Resumen

La cartografía y la clasificación de suelos a escala semidetallada contribuyen a la toma de decisiones sobre usos intensivos de tierras agrícolas a nivel de regiones pequeñas, municipios y tierras agrícolas comunales (ejidos). Este tipo de estudios son escasos en el trópico mexicano, en especial aquellos que relacionan los aspectos del paisaje con los suelos existentes en una región. El conocer estas relaciones permitirá a futuro realizar estudios de suelos más eficientes y económicos. El objetivo del trabajo fue zonificar los paisajes geomorfológicos y el relieve/modelado para clasificar unidades de suelos en las Planicies y Terrazas de Tacotalpa y Jalapa en Tabasco, México. Con base en el enfoque geopedológico se clasificaron y cartografiaron los paisajes geomorfológicos a escala 1:250000 y el relieve/modelado a escala 1:50000. A la misma escala se clasificaron y cartografiaron los grupos y unidades de suelo, con el apoyo de ortofotos, un modelo digital de elevación y verificación en campo. El 82% corresponde a un área plana sobre sedimentos fluviales y palustres. El área restante corresponde a los paisajes de terrazas y lomeríos. Se cartografiaron catorce relieve/modelados: cauce activo, cauce inactivo,

dique natural alto y bajo, playa de meandro, llanura de inundación, cubeta de decantación, valle acumulativo, lomerío bajo ligeramente convexo a cóncavo, lomerío bajo ligeramente convexo, lomerío bajo a alto ligeramente convexo, lomerío alto moderadamente convexo, lomerío fuertemente convexo y valle erosivo. Se clasificaron seis grupos de suelo: Gleysols 65%, Fluvisols 15%, Lixisols 8%, Luvisols 8%, Alisols 4.02% e Histosols 1%, con 27 calificadores (primarios y secundarios). El estudio a la escala 1:50000 permitió explicar la distribución geográfica de las unidades de suelo en las diferentes geoformas y relieves/modelados.

Palabras claves: Geopedología; SIG; Suelos tropicales y Clasificación de suelos.

Abstract

The cartography and soil classification at a semi-detailed scale contributes to the decision making on intensive uses of agricultural land at the level of small regions, municipalities and communal agricultural land (hh). Studies of this type are scarce in the Mexican tropic, specifically those that relate landscape aspects with regional soils. Knowledge of these relations allows more efficient and economic soil surveys. The objective of this work is to zone the geomorphological landscapes and relief/modeling to classify soil units in the plains and terraces of Tacotalpa and Jalapa in Tabasco, Mexico. Based on the geopedological approach, geomorphological landscapes at 1:250000 scale and relief/modeling at 1:50000 scale were classified and mapped. At the same scales, soil groups and soil units were classified and mapped, with the support of orthophotos, a digital elevation model, and field verification. Eighty-two percent of the study area corresponds to a flat area on fluvial and marshy sediments. The remaining area corresponds to terraces and hills. Fourteen reliefs/models were mapped: active channel, inactive channel, high and low natural dam, meander beach, floodplain, decantation basin, cumulative valley, low hillock slightly convex to concave, low lomerio slightly convex, low to high lomerio slightly convex, moderately convex high hill, strongly convex hill, and erosive valley. Six soil groups were classified: Gleysols 65%, Fluvisols 15%, Lixisols 8%, Luvisols 7%, Alisols 4.02%, and Histosols 1%, with 27 qualifiers (primary and secondary). This study at the scale 1:50000 allows explaining the geographical distribution of the soil units in the different geoforms and relief/modeling.

Keywords: Geopedology; GIS; Tropical soils; Soil classification.

Introducción

La cartografía y la clasificación de suelos han sido áreas claves de investigación en las disciplinas de la ciencia del suelo (Hartemink y Bockheim, 2013; Brevik *et al.*, 2016; Aksoy *et al.*, 2017). La cartografía de suelos permite explicar la distribución espacial de las propiedades edáficas y su relación con el relieve (Buol *et al.*, 1990; Bautista-Zuñiga *et al.*, 2004; Miller y Schaetzl, 2014; Escribano *et al.*, 2016), mientras que la clasificación de los suelos tiene como propósito organizar sus propiedades edáficas y dar una nomenclatura al suelo, con la intención de ubicar su localización y el área que ocupa en un territorio específico (Porta *et al.*, 2013; IUSS Working Group, 2015). Estas dos disciplinas son útiles en la toma de decisiones sobre la agricultura, los recursos naturales, planes de desarrollo productivos y proyectos sociales (Zinck, 1989; Esfandiarpour *et al.*, 2009).

En el sureste mexicano, se han realizado estudios de clasificación de suelos a escala semidetallada y de reconocimiento (Bautista *et al.*, 2015; Palma-López *et al.*, 2017). En Tabasco la cartografía de suelos más conocida es de escala 1:250000 (Palma-López *et al.*, 2007; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a). En contraste, la información a escala semidetallada y detallada es limitada, en algunos casos desactualizada y no es de fácil acceso (Martínez-Villegas, 2007; Zavala-Cruz *et al.*, 2014), lo que dificulta la toma de decisiones sobre usos intensivos a nivel de regiones pequeñas, municipios y ejidos. Al respecto, los estudios de suelos a escalas mayores son costosos y requieren gran cantidad de tiempo para ser desarrollados por lo que son escasos en México, especialmente en el sureste del país. Como alternativa a las metodologías convencionales de levantamiento de suelos, la geopedología explica el complejo proceso de formación de suelos dentro de un marco controlado por la geomorfología (Bocco *et al.*, 2010; Farshad, 2013), y se propone como un método de apoyo al levantamiento de suelo (Esfandiarpour *et al.*, 2010; Paladino *et al.*, 2017). El enfoque geopedológico es una contribución geomorfológica y pedológica para conocer la distribución espacial y taxonómica de los suelos y, combinado con las técnicas cartográficas modernas, permite ahorrar tiempo y recursos al obtener la cartografía de

geoformas contenedoras de los suelos, a escala detallada de una manera más rápida y precisa (Zinck, 2012). En el sureste se han hecho algunos esfuerzos para utilizar este concepto en zonas limitadas que han permitido plantear que es posible optimizar el tiempo de ejecución de estudios a nivel de semidetalle, sin perder la precisión requerida en los estudios, en paisajes geomorfológicos de planicies, terrazas, lomeríos, valles y su diversidad de relieves (Bautista-Zuñiga *et al.*, 2015; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a; López-Castañeda *et al.*, 2017; Palma-López *et al.*, 2017).

Objetivo

Zonificar la variabilidad de los suelos en Planicies y Terrazas de Tacotalpa y Jalapa, Tabasco (PTTJ), con base en el enfoque geopedológico (Zinck, 2012); clasificar los paisajes geomorfológicos a escala 1:250000, así como el relieve/modelado a escala 1:50000, y a esta escala determinar los grupos de suelos y sus calificadores (primarios y secundarios), partiendo de la hipótesis de que, al realizar la cartografía de suelo a escala semidetallada, se obtendrá una mayor variabilidad de suelos clasificados.

Descripciones de área de trabajo, métodos y materiales estudiados

Área de trabajo

El área de estudio de PTTJ se ubica en la provincia fisográfica Llanura Costera del Golfo Sur, en los municipios de Jalapa y Tacotalpa, al sur del estado de Tabasco, México. Tiene una extensión de 138,143 ha, ubicada entre las coordenadas 17° 31' 57" y 17° 47' 44" N y 92° 42' 55" y 92° 54' 22" O; limita al norte con los municipios de Macuspana y Centro, al sur y al este con el estado de Chiapas y al oeste con los municipios de Teapa y Centro (INEGI, 2016). El clima se caracteriza por ser cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am(f) en Jalapa y cálido húmedo con lluvias todo el año Af(m) en Tacotalpa, con precipitación media de 2 500 a 4 000 mm por año, y temperatura media de 26°C. La hidrología está conformada por la parte media y

baja de las cuencas de los ríos Grijalva, Teapa y Tacotalpa (Palma-López *et al.*, 2007; INEGI, 2016).

La metodología consistió en cartografiar los paisajes geomorfológicos y relieve/modelados con el enfoque geopedológico para usarlos como base en la cartografía y clasificación de los suelos (Zinck, 2012).

Cartografía de paisajes geomorfológicos y relieve/modelado

La zonificación de paisajes geomorfológicos escala 1:250000 se mejoró a partir de regionalizaciones generadas por Ortiz-Pérez *et al.* (2005) y Zavala-Cruz *et al.* (2016a), y la nomenclatura de relieve-modelados a escala 1:50000 se adoptó de estudios geomorfológicos y geopedológicos de Palma-López *et al.* (2012) y Zavala-Cruz *et al.* (2012). La cartografía geomorfológica se elaboró mediante la integración de las bases utilizando el sistema de información geográfica (SIG) ARC GIS 9.3. (ESRI, 2004).

Los linderos de relieve/modelados se precisaron mediante el análisis de: a) forma, identificando elementos de la superficie terrestre por sus características geométricas (Lugo 2011), y agrupando zonas con espaciamiento similar de isoclinas expresadas en el modelo digital de elevación (MDE) a escala 1: 50000 (INEGI, 2011); b) tono y textura, mediante fotointerpretación de las ortofotos: E15d11f, E15d11e, E15d21a, E15d21b, E15d21c, E15d21d, E15d21e1, E15d21f , a escala 1:20000 (INEGI, 2011), ayudó a delimitar geoformas cóncavas con vegetación hidrófita; c) procesos geomorfológicos, reportados en varios estudios (Ortiz-Pérez *et al.*, 2005; Zavala *et al.*, 2012; Palma-López *et al.*, 2012; Bautista *et al.*, 2015; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a); d) altura sobre el nivel del mar (msnm) y pendiente (%), mediante la generación de mapas ipsométrico y pendientes (IMTA, 1989), basados en el MDE, utilizando el programa Arc Gis 9.3; además, la consulta de mapas topográficos de INEGI, y la verificación en campo con GPS y brújula Bruntón; e) tipo de roca y edad, a partir de la carta geológico-minera (SGM, 2005).

Los linderos de relieve/modelados se precisaron con el análisis de la:

- a) Forma. Se identificaron características geométricas de la superficie terrestre (Castillo y Lugo- Hubp, 2011) y se agruparon zonas con espaciamiento similar de isolíneas expresadas en el modelo digital de elevación (MDE) a escala 1:50000 (INEGI, 2011);
- b) Tono y textura, mediante fotointerpretación de ortofotos: E15d11f, E15d11e, E15d21a, E15d21b, E15d21c, E15d21d, E15d21e1 y E15d21f, a escala 1:20000 (INEGI, 2011), lo cual ayudó a delimitar geoformas cóncavas con vegetación hidrófila;
- c) Procesos geomorfológicos reportados en varios estudios (Ortiz-Pérez *et al.*, 2005; Zavala *et al.*, 2012; Palma-López *et al.*, 2012; Bautista *et al.*, 2015; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a; López-Castañeda *et al.*, 2017);
- d) Altura sobre el nivel del mar (msnm) y pendiente (%). Este análisis se realizó con la generación del mapa ipsométrico y de pendientes (IMTA, 1989), basados en el MDE, por medio del programa ARC GIS 9.3; además, se consultaron mapas topográficos de INEGI y se verificaron en campo con GPS y brújula Brunton;
- e) Tipo de roca y edad. Se determinó a partir de la carta geológico-minera (SGM, 2008).

Cartografía de suelos

La cartografía de paisajes geomorfológicos y relieve/modelados se utilizó como base para definir los sitios de muestreo y barrenaciones de suelo en campo, así como para establecer relaciones de toposecuencia y biosecuencia con los suelos, de acuerdo con la accesibilidad y el tiempo requerido para el muestreo. Se seleccionaron dos transectos con dirección noreste a suroeste, tomando en cuenta la mayor variabilidad de relieve/modelados, pendientes, alturas, presencia de ecosistemas y agrosistemas; el primero se ubica en terrazas y planicies del noreste, en el municipio de Jalapa, y el segundo en terrazas y planicies del suroeste, en el municipio de Tacotalpa. La ubicación y orientación de los transectos fue con la finalidad de obtener la mayor diversidad de unidades de suelo en la zona de estudio (Zavala-Cruz *et al.*, 2014). Se realizaron catorce perfiles de suelos, al menos uno por tipo de relieve/modelado, distribuidos en ecosistemas y agrosistemas en PTTJ (Figura 4). Adicionalmente, para disminuir el trabajo de campo se colectaron datos físicos y químicos de perfiles descritos en varios relieves/modelados de la zona (Zavala-Cruz *et al.*, 2009; Zavala *et al.*, 2016b). Los perfiles edafológicos fueron descritos de

acuerdo con el manual de Cuanalo (1990). Se colectó un kg de suelo por cada horizonte en bolsas de polietileno, previamente etiquetadas y se secaron al aire y bajo sombra. Los parámetros físicos y químicos que se determinaron para cada horizonte fueron: pH medido con cloruro de potasio (1:2.5); pH determinado mediante potenciometría en agua (1:2); conductividad eléctrica (CE) con extracto de saturación de un suelo por medición electrolítica (cationes y aniones); el contenido de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black; nitrógeno total (N) mediante Semi-micro Kjeldahl; fósforo extraíble (P) por el procesamiento de P-Olsen; bases intercambiables (K^+ , Ca^+ , Mg^+ y Na^+) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante extracción con acetato de amonio 1N, pH 7.0 y cuantificación por absorción atómica; textura por el método de hidrómetro de Bouyoucos, con base en los criterios de la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT, 2000). Para los horizontes de suelos orgánicos, la materia orgánica se cuantificó por el método de incineración (Soil Survey Staff, 2014). La clasificación del grupo de suelo y calificadores se llevó a cabo siguiendo la Base Referencial Mundial de Recurso Suelo (IUSS Working Group, 2015). La verificación de algunos linderos de las unidades de suelo se hizo mediante 200 barrenaciones, con barrena tipo holandesa, hasta 120 cm de profundidad, y posteriormente se comparó con las características edafológicas (profundidad, color, textura) de los perfiles descritos y clasificados. Se elaboró la cartografía de unidades de suelos a escala 1:50000, por medio de SIG utilizando el programa ARG GIS 9.3.

Resultados

Paisajes geomorfológicos y relieve/modelado

La zona de estudio PTTJ tiene tres paisajes geomorfológicos: planicie fluvial activa (PFA), terraza costera detrítica (TCD) y lomerío suave a inclinado volcánico (LSIV) (Tabla 1; Figura 1). El paisaje dominante es la PFA, con 82% de la superficie total, que es un área plana que ocupa la posición topográfica más baja, sobre sedimentos fluviales y palustres del Cuaternario Holoceno. El 18% restante de la región corresponde a los paisajes de terrazas y lomeríos, dominados por procesos de erosión e intemperización, sobre rocas sedimentarias detríticas y brecha andesítica de edad Terciario Paleoceno al Cuaternario Pleistoceno, con alturas de 7 a 70 msnm (Zavala-Cruz *et al.*, 2016a).

En la PFA, los relieve/modelados son originados por acumulación de materiales aluviales gruesos a finos, de pendiente plana a cóncava, menores a 2% y altura de 8 a 27 msnm. En sentido perpendicular a los cauces de los ríos se desarrollan los relieve/modelados:

a) Cauce activo, caracterizado por el patrón meándrico, abundancia de cauces inactivos y meandros estrangulados;

b) Dique natural alto y dique natural bajo, que se ubican a ambos lados de los cauces y actúan como barreras naturales contenedoras de los cauces; se forman por la mayor acumulación de sedimentos medios a finos durante los desbordamientos extraordinarios de los ríos; ocupan la posición topográfica más alta y su forma ligeramente convexa favorece el buen drenaje superficial; sobresalen en el río Tacotalpa y solo se inundan unos días al año en la época de lluvias;

c) Playa de meandro, que se localiza en la curva interna de los meandros del río Tacotalpa, entre el cauce y los diques naturales, se origina por migraciones de los meandros; tiene sedimentos limosos, pendientes suaves y puede inundarse unos días al año;

d) Llanura de inundación, que es la geoforma más extensa del área de estudio, varía de plana a ligeramente cóncava; los diques naturales la aíslan parcialmente de los cauces pero tiene conexión con los ríos a través de arroyos; prevalecen los sedimentos finos y medios; se inunda varios meses en la época de lluvias, por inundaciones fluviales y pluviales;

e) Cubeta de decantación, geoforma cóncava que ocupa la parte central de las llanuras de inundación en las zonas topográficas más bajas; su forma y las pendientes casi planas contribuyen a las inundaciones anuales en periodos mayores a seis meses; los sedimentos son arcillosos y orgánicos. En áreas próximas a las terrazas del sur existen pequeñas superficies de lomeríos bajos a altos ligeramente convexos, los cuales se encuentran en proceso de intemperización y tienen drenaje superficial moderado (Figura 2 y Tabla 1).

El paisaje geomorfológico de TCD está conformado por relieves planos a fuertemente convexos, con alturas de 7 a 46 msnm y pendientes de 2 a 30%, con basamentos de rocas areniscas-lutitas en el noreste y lutitas-areniscas en el sureste, en su mayoría con buen drenaje superficial. Ha sido

modelado por procesos de intemperización, erosión y acumulación. De la zona baja a la alta se presentan los relieve/modelados:

a) Lomerío bajo ligeramente convexo a cóncavo, que se caracteriza por ser una extensión de terreno con problemas de drenaje, dominado por los procesos de acumulación e intemperización; presenta la posición topográfica más baja y las pendientes más suaves;

b) Lomerío bajo ligeramente convexo, cuya pendiente y altura aumentan respecto al lomerío anterior, además del proceso de intemperización inicia la erosión;

En forma ascendente se encuentran:

c) Lomerío bajo a alto ligeramente convexo, d) Lomerío alto moderadamente convexo y e) Lomerío alto fuertemente convexo; en estos lomeríos dominan los procesos de intemperización y erosión, con incremento de la altura y las pendientes son de moderadas a fuertes. También se presenta f) Valle acumulativo, que es un relieve plano (pendiente menor a 2%), estrecho y alargado, situado entre los lomeríos, en transición con la PFA; acumula sedimentos fluviodeluviales aportados por arroyos que drenan las terrazas altas; se inunda intermitentemente en la época de lluvias. La mayor área corresponde a lomeríos bajos ligeramente convexos, derivados de procesos de intemperización (Figura 2 y Tabla 1).

En el paisaje de LSIV, los relieves son de forma cóncava-convexa, sobre materiales de brecha volcánica andesítica, con una altura que varía entre los 20 y 70 msnm, con pendientes de 2 a 30% y, por lo tanto, son relieves susceptibles a procesos de intemperización y erosión. De la parte baja a la cima se encuentran los relieve/modelados: a) Lomerío bajo ligeramente convexo; b) Lomerío alto fuertemente convexo; c) Valle acumulativo, y d) Valle erosivo. Dominan las superficies de lomerío alto fuertemente convexo con mayor efecto de los procesos erosivos (Figura 2 y Tabla 1).

Tabla 1. Relieve/modelado y variabilidad de las unidades de suelos en el sur de Tabasco, México.

Paisaje geomorfológico	Relieve/modelado	Unidades de suelo	Datos morfométricos				Superficie	
			Altura (msnm)	Pendiente (%)	Roca	Proceso	ha	%
PFA	Cauce activo		10-15	<1	Sal	A,E	415	1.0
	Cauce inactivo	GL-st.fv.eu-ce.hu	10-17	<1	Sal	A	797	2.0
	Dique natural alto	FL-fve.gl.st.eu-lo	21-27	2-4	Sal	A	542	1.3
	Dique natural bajo	FL-fve.gl.eu-hu.lo	10-24	2-4	Sal	A	5091	12.5
	Playa de meandro	FL-fve.eu-lo	10-23	2-7	Sal	A,E	991	2.4
	Llanura de inundación	GL-st.eu-lo,oh	8-25	0-2	Sal	A	20417	50.0
	Cubeta de decantación	GL-hi.oy.eu-cen.lop.hu	7-21	0-2	Sp	A	5197	12.7
	Lomerío bajo a alto ligeramente convexo	AL-fr-ct.ce.oh.pn	15-30	7-30	Lu-Ar	A,I	70	0.2
Lomerío bajo ligeramente convexo	AL-ab-cu.df.cen.lop.jd	16-23	7-15	Bva	A,I	74	0.2	
TCD	Valle acumulativo	GL-fl.eu-ce.hu	7-15	0-2	Ar-Lu, Lu-Ar	A	561	1.4
	Lomerío bajo ligeramente convexo a cóncavo	LV-gl-ct.hu-je.lo.qv	10-13	2-4	Ar-Lu	A,I	1488	3.6
	Lomerío bajo ligeramente convexo	LX-ab-fr-ct.df.cen.lop.hu.je.pn	13-17	4-7	Ar-Lu	A,I,E	1557	3.8
	Lomerío bajo a alto ligeramente convexo	AL-fr-ct.ce.oh.pn	15-30	7-30	Lu-Ar	I,E	426	1.0
	Lomerío alto moderadamente convexo	LV-ha-cu.cen.lop.je.oh	17-34	7-15	Ar-Lu	I,E	908	2.2
	Lomerío alto fuertemente convexo	LV-ha-cu.cen.lop.je.oh	35-46	15-30	Ar-Lu	I,E	214	0.5
LSIV	Valle acumulativo	HS-hm.dr.rh.jd-mi	20-25	0-2	Bva	A	260	0.6
	Valle erosivo	LX-ab-cr-ct.df.cen.lop.je.pn	21-36	15-30	Bva	I,E	9	0
	Lomerío bajo ligeramente convexo	AL-ab-cu.df.cen.lop	16-23	7-15	Bva	I,E	99	0.2
	Lomerío alto fuertemente convexo	LX-ab-cr-ct.df.cen.lop.je.pn	24-70	15-30	Bva	I,E	1558	3.8
Área urbana							149	0.4
<p>Paisaje geomorfológico: PFA/ Planicie fluvial activa, TCD/ Terraza costera detrítica, LSIV/ Lomerío suave a inclinado volcánico. Unidades de suelo: GL-st.fl.eu-ce.hu/Eutric Fluvi Stagnic Gleysol (Clayic, Humic), FL.fve.gl.st.eu-lo/ Eutric Stagnic Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Loamic), FL-fve.gl.eu-hu.lo/ Eutric Gleyic Pantofluvic Fluvisol (Humic, Loamic), FL-fve.eu-lo/ Eutric Pantofluvic Fluvisol (Loamic), GL-st.eu-lo.oh/Eutric Stagnic Gleysol (Loamic, Ochric), GL-hi.oy.eu-cen.lop.hu/ Eutric Oxigleyic Histic Gleysol (Endoclayic, Epiloamic, Humic), GL-fv.eu-ce.hu/Eutric Fluvi Gleysol (Clayic, Humic) LV-gl-ct.hu-je.lo.qv/ Gleyic Luvisol (Cutanic, Humic, Hypereutric, Loamic, Protovertic), LX-ab-fr-ct.df.cen.lop.hu.je.pn/ Ferric Abruptic Lixisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Humic, Hypereutric, Profondic) AL-fe-ct.ce.oh.pn/ Ferric Alisol (Cutanic, Clayic, Ochric, Profondic), LV-ha-cu.cen.lop.je.oh/ Haplic Luvisol (Cutanic, Endoclayic, Epiloamic, Hipereutric, Ochric), HS-hm.dr.rh.jd-mi/Hyperdystric Rheic Drainic Hemic Histosol (Mineralic), LX-ap-cr-ct.df.cen.lop.je.pn/ Chormic Abruptic Lixisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Hipereutric, Profondic), AL-ab-cu.df.cen.lop.jd/ Abruptic Alisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Hyperdistric). Roca: Sal/ Sedimentos aluviales, Sp/ Sedimentos palustres, Lu/ Lutita, Ar Arenisca, Bva/ Brecha volcánica andesítica. Proceso Geomorfológico: A Acumulación, I Intemperización, E Erosión.</p>								

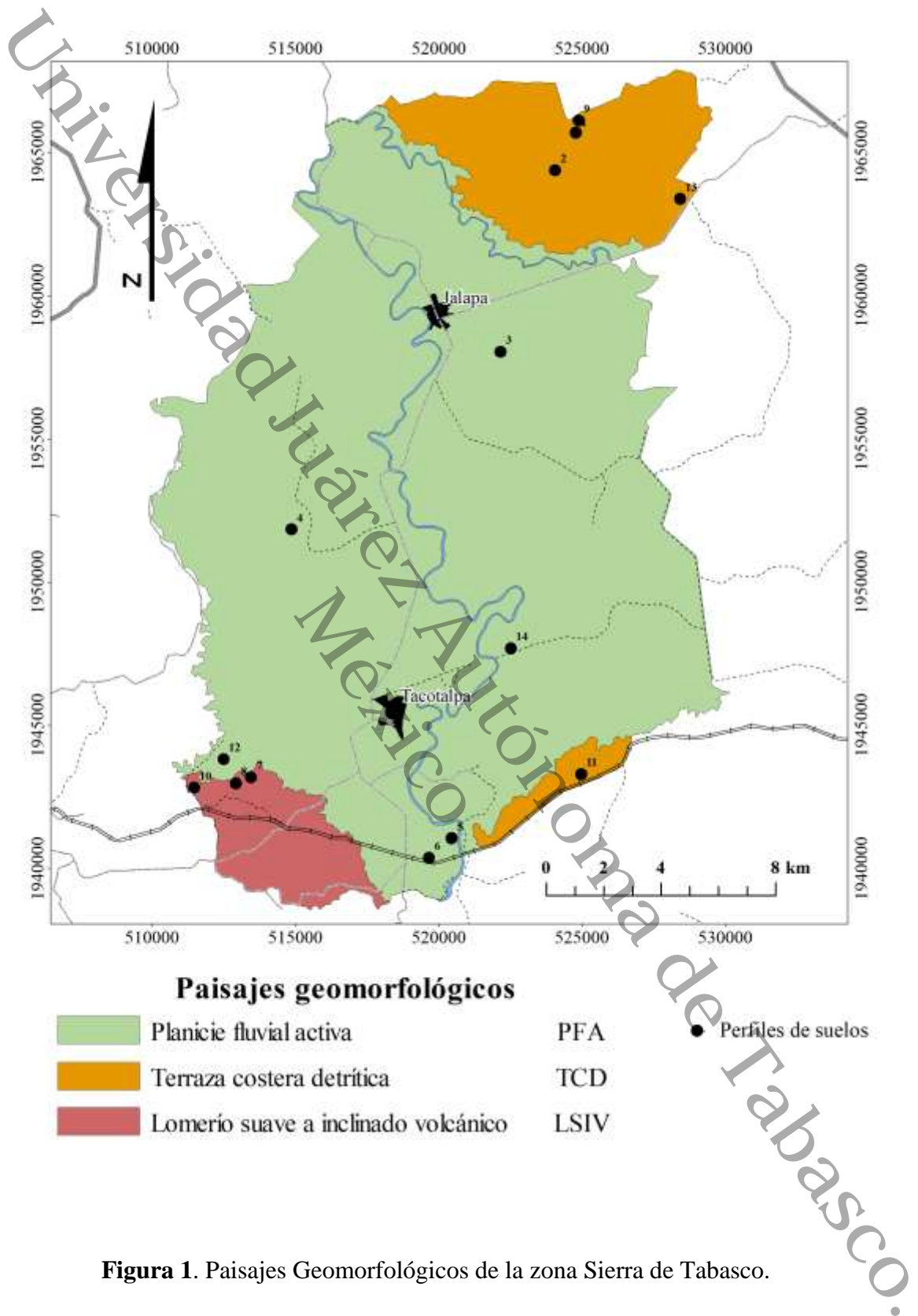


Figura 1. Paisajes Geomorfológicos de la zona Sierra de Tabasco.

Suelos en los paisajes geomorfológicos

En los paisajes geomorfológicos de PTTJ se encuentran distribuidos seis grupos y 15 unidades de suelo sobre 14 relieve/modelados; cada relieve desarrolla una unidad diferenciada por uno o más calificadores, excepto los lomeríos altos de la TCD, que desarrollan la unidad de suelo Haplic Luvisols (Cutanic, Endoclayic, Epiloamic, Hypereutric, Ochric) LV-ha-cu.cen.lop.je.oh. La PFA tiene suelos poco desarrollados (perfiles con horizontes A/C), dominan los Gleysols (GL) y Fluvisols (FL). Los otros paisajes contienen suelos desarrollados (perfiles con horizontes A/B/C): en la TCD prevalecen los Luvisols (LV) y Lixisols (LX), y en el LSIV dominan los Lixisols (LX) (Figura 3 y Tabla 1).

Suelos de la Planicie Fluvial Activa (PFA)

Los suelos asociados a los relieves de la PFA se formaron a partir de la acumulación de sedimentos aluviales y palustres, originando texturas francas, franco-arcillosas y arcillosas en el horizonte superficial. En los diques naturales y en las playas de meandro se desarrollan los Fluvisols (FL) (Tabla 1), presentando clases texturales de franca, franco-arenosa, franco-arcillosa o franco arcillo-limosa en el perfil (Figuras 3 y 4).

En los relieves de posición topográfica baja dominan los Gleysols con diversos calificadores (GL). Esta zona exhibe condiciones reductoras y un patrón de color gléyico debido al manto freático elevado y estancamiento de agua asociado a texturas medias y finas, lo que no favorece el drenaje interno pobre del perfil (Tabla 1). Los lomeríos aislados en la PFA desarrollan suelos típicos de la TCD (Figuras 3 y 4).

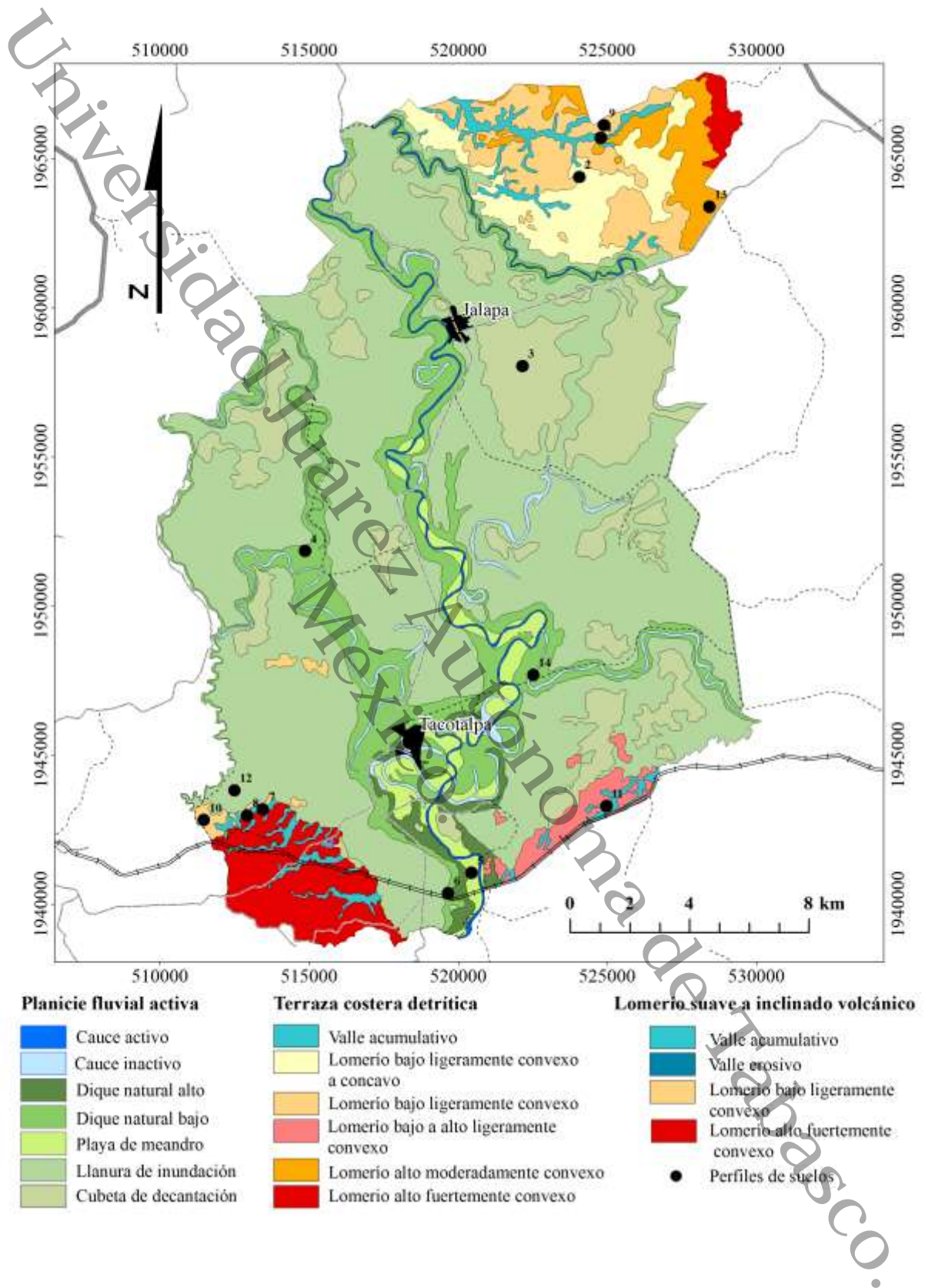


Figura 2. Relieve/modelados en la zona Sierra Tabasco, México.

Suelos de la Terraza Costera Detrítica (TCD)

La TCD origina los suelos desarrollados de los grupos Luvisol (LV), Lixisol (LX) y Alisol (AL) sobre relieves de lomeríos. Todos los suelos presentan un horizonte Bt originado por la iluviación de la arcilla y diversos grados de acidez, esto último dependiendo de la baja saturación de bases de los LX y AL y de la moderada a alta saturación de bases en los LV (Tabla 1). Las diferencias de grupo y unidades se asocian al tipo de roca, ya que las dos terrazas difieren en su litología sedimentaria (areniscas-lutitas en el noreste y lutitas-areniscas en el sureste) y en su edad (del Terciario Paleoceno al Cuaternario Pleistoceno) (SGM, 2008). En los valles acumulativos, las pendientes casi planas reciben aportes de materiales y nutrimentos de los lomeríos, formando Gleysols; sobresale el proceso de gleyzación en los horizontes superficiales, debido a las inundaciones recurrentes y la saturación del perfil en la época de lluvias, además del contenido alto de materia orgánica (Figuras 3 y 4).

Suelos del Lomerío Suave a Inclinado Volcánico (LSIV)

Los suelos del paisaje LSIV, en el municipio de Tacotalpa, se desarrollaron en relieves de lomerío convexo, a partir de la roca brecha volcánica andesítica. La precipitación abundante todo el año de 3000 a 4000 mm y la alta temperatura de 26°C determinaron fuertes procesos de intemperización, erosión y lixiviación de las bases intercambiables. La interacción de estos factores originaron los AL y LX; ambos grupos de suelos tienen buen drenaje interno y texturas medias en los horizontes superficiales y arcillosas en los horizontes subsuperficiales debido al proceso de argilización (Tabla 1 y Figura 3). En los valles acumulativos más estrechos se forman suelos similares a la TCD, mientras que, en los valles con condiciones similares a las cubetas de decantación, se forman los suelos Histosols (HS). La presencia de este suelo orgánico en estos lomeríos resultó sorprendente dado el tipo de drenaje superficial existente en el entorno, pero se explica con la presencia de horizonte C mineral de textura gruesa en la profundidad (Figuras 3 y 4). Esta unidad representa el único suelo orgánico encontrado en el área de estudio.

Discusión

Ambientes geomorfológicos en la zona Sierra de Tabasco, México

Las Planicies y Terrazas de Tacotalpa y Jalapa se dividen en tres paisajes geomorfológicos: PFA, TCD y LSIV (Figura 1). Su fisiografía en general concuerda con regiones de planicies fluviales y terrazas detríticas reportadas como unidades ecogeográficas, paisajes geomorfológicos, unidades geomorfológicas y localidades a escala de reconocimiento (1:250000) reportadas por Ortiz-Pérez *et al.* (2005), Bollo-Manent y Hernández-Santana (2008), Solís-Castillo *et al.* (2014) y Zavala-Cruz *et al.* (2016a). Sin embargo, en este trabajo los linderos de los paisajes geomorfológicos de la PTTJ se mejoraron respecto a los estudios citados, al zonificar los relieves-modelados en el MDE y los ortofotomapas, con un criterio de área mínima cartografiada de 6 ha (0.25 cm² de mapa) a escala 1:50000. Posteriormente, al agrupar los patrones repetitivos de relieve/modelados de cada paisaje geomorfológico, resultaron unidades cartográficas con linderos más precisos a este nivel de geoforma.

En la PFA, la secuencia del relieve/modelados que ocupan mayor superficie, desde los cauces activos e inactivos hasta las zonas distales, es de diques naturales, llanura de inundación y cubetas de decantación. En el mismo sentido, varía el tipo de sedimentos aluviales de arenas a arcillas y el tiempo de inundación por periodos cortos hasta por más de seis meses al año; este arreglo de geoformas fluviales concuerda con la cartografía geomorfológica generada por Romo y Ortiz-Pérez (2001), Garnica-Peña y Alcántara-Ayala (2004), Solís-Castillo *et al.* (2014), Ramos-Reyes *et al.* (2016) y Zavala-Cruz *et al.* (2016b) para diversas planicies fluviales. Se destaca el espacio ocupado (6.6% de la PFA) por los relieves de cauces activos e inactivos, meandros estrangulados y playas de meandro, en el río Tacotalpa, que son evidencia de la intensa dinámica fluvial, caracterizada por migraciones laterales en las avenidas extraordinarias durante el Cuaternario Holoceno (Ortiz-Pérez *et al.*, 2005; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a y b) y por desembocar en los principales sistemas deltaicos y estuarios del Golfo de México (Lanza-Espino *et al.*, 2013). Estos relieve/modelados y la interacción de procesos exógenos, principalmente por los hidrometeorológicos, se han observado para las zonas de llanura aluvial en Nayarit (Romo y Ortiz-Pérez, 2001; García-Sancho *et al.*, 2009), en las planicies ribereñas en Australia

(Kemp *et al.*, 2017) y en otras zonas fluviales del mundo (Martín-Vide, 2015; Harmand *et al.*, 2017). Como anomalías de la PFA, en zonas próximas a las terrazas y lomeríos situados al sur, se localizan islas de lomeríos bajos a altos ligeramente convexos con materiales similares a los de la TCD, coincidiendo con lo reportado por Zavala-Cruz *et al.* (2016b), las cuales no aparecen identificadas en los mapas geomorfológicos a escala 1:250000 de Ortiz-Perez *et al.* (2005) y Zavala-Cruz *et al.* (2016a).

En la TCD se zonificó una secuencia de relieves con morfometría distinta. De la base a la cima se identificaron dos grupos. El primero corresponde a relieves negativos como el valle acumulativo y el lomerío bajo ligeramente inclinado a cóncavo. Ambos son casi planos, ocupan la posición topográfica más baja de la TCD, se ubican en transición con la PFA, y son receptores de flujos de agua y sedimentos aportados por los lomeríos convexos; en este contexto el valle sufre inundaciones estacionales. El segundo grupo corresponde a relieves positivos de bajos a altos de ligera a fuertemente convexos. Estos coinciden con laderas y cimas de pendiente suave a inclinada, bien drenadas, sujetas a intemperización y erosión, y por lo tanto transfieren materiales a los relieves negativos; los procesos endógenos y exógenos y tipo de roca coinciden con las características de las terrazas costeras de sedimentos detríticos zonificados por Zavala-Cruz *et al.* (2016b) y Ramos-Reyes *et al.* (2016). En otras terrazas costeras del sureste de México se reportan relieves similares clasificados como valle, terraza plana o inferior, terraza meso-mesiforme y terraza cumbral o interfluvio (Bollo-Manent y Hernández-Santana, 2008; Solís-Castillo *et al.*, 2014).

Los relieves del paisaje de LSIV ocupan las mayores altitudes y pendientes del área de estudio. Sobresalen los lomeríos convexos modelados por procesos erosivos y denudativos, y los valles acumulativos, similares a geformas de interfluvios, pendientes y valles cartografiados en llanuras onduladas del suroeste de Tabasco y noroeste de Chiapas (Bollo-Manent y Hernández-Santana, 2008).

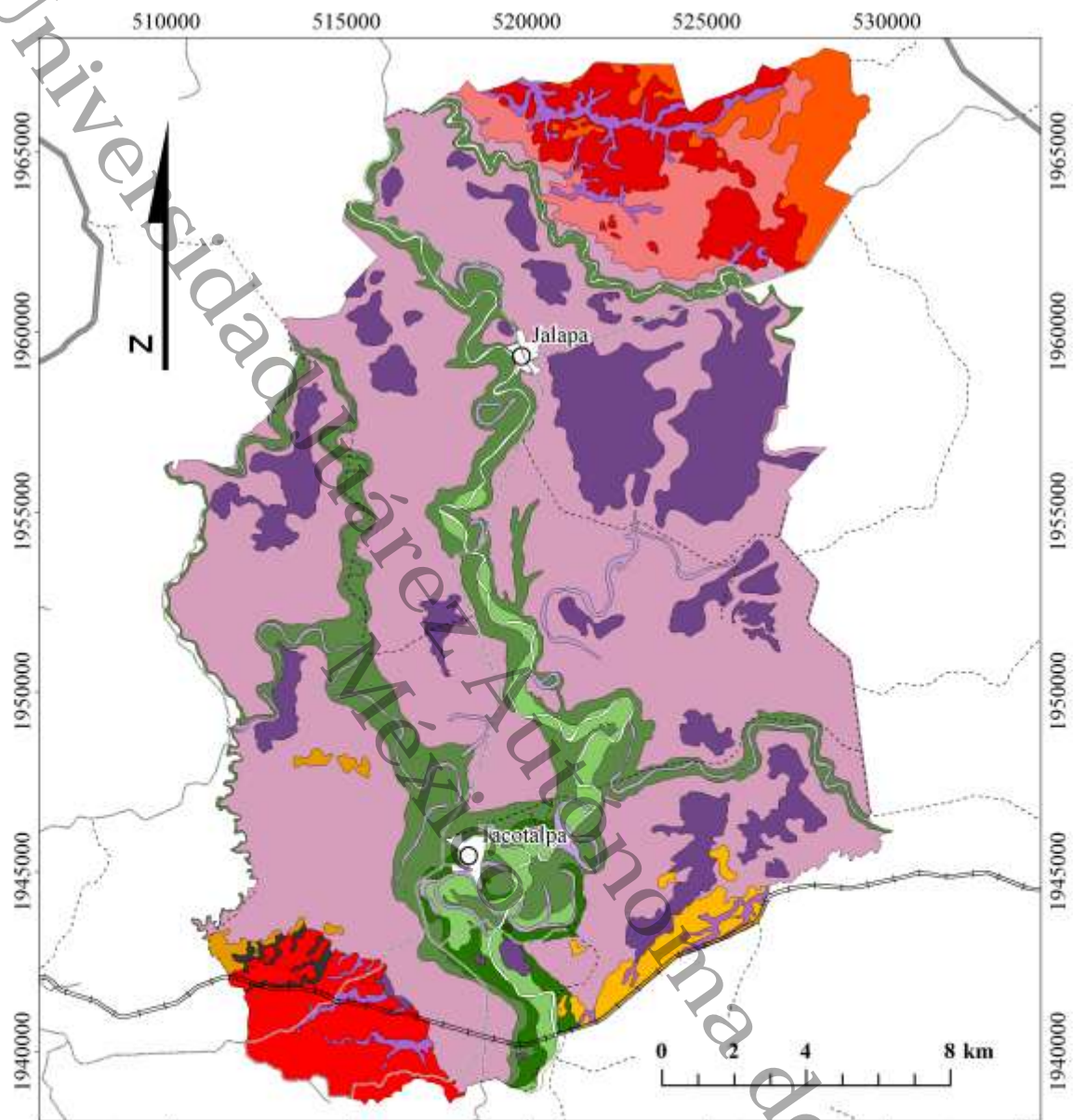
Geopedología en la Sierra de Tabasco, México

Los paisajes geomorfológicos y relieve/modelados (Figuras 1 y 2) influyen en la variabilidad de los grupos y unidades de suelo en la zona de PTTJ (Figura 3 y Tabla 1). Los grupos de suelo asociados con la PFA tienen perfiles poco desarrollados con horizontes A-C

y O-C. Los Gleysols (GL) son dominantes y se distinguen por su drenaje interno deficiente, asociado al manto freático elevado, que genera procesos de óxido-reducción. Estos suelos están asociados a relieves negativos en los paisajes de planicies fluviales (Ortiz-Pérez *et al.*,

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

2005; Palma-López *et al.*, 2007; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a y b).



PFA	Eutric Fluvisc Stagnic Gleysol (Clayic, Humic)	GL-fl-uv-cs-ce-hu	
	Eutric Stagnic Gleyic Pantofluvisc Fluvisol (Loamic)	FL-iv-ge-gl-st-uv-lo	
	Eutric Gleyic Pantofluvisc Fluvisol (Humic, Loamic)	FL-iv-ge-hu-lo	
	Eutric Pantofluvisc Fluvisol (Loamic)	FL-iv-ct-lo	
	Eutric Stagnic Gleysol (Loamic, Ochric)	GL-st-uv-lo-oh	
	Eutric Oxigleyic Histic Gleysol (Endoclayic, Epiloamic, Humic)	GL-hi-oy-uv-cen-kop-hu	
	Ferri Alisol (Cutanic, Clayic, Ochric, Profondic)	AL-fr-ct-cc-oh-pn	
	Abruptic Alisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Hyperdystric)	AL-ap-cudf-cc-kop-jd	
TCD	Eutric Fluvisc Gleysol (Clayic, Humic)	GL-fl-uv-cs-hu	
	Gleyic Luvisol (Cutanic, Humic, Hypereutric, Loamic, Protovertic)	LV-gl-ct-hu-je-lo-qt	
	Ferri Abruptic Lixisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Humic, Hypereutric, Profondic)	LX-ap-fr-ct-df-cen-kop-hu-je-pn	
	Ferri Alisol (Cutanic, Clayic, Ochric, Profondic)	AL-fr-ct-cc-oh-pn	
	Haplic Luvisol (Cutanic, Epiloamic, Endoclayic, Hypereutric, Ochric)	LV-hu-cu-cen-kop-je-oh	
	Haplic Luvisol (Cutanic, Epiloamic, Endoclayic, Hypereutric, Ochric)	LV-hu-cu-cen-kop-je-oh	
LSIV	Hyperdystric Rheic Drainic Hemic Histosol (Mineralic)	HS-hm-dr-rh-jd-mn	
	Eutric Fluvisc Gleysol (Clayic, Humic)	GL-fl-uv-cs-hu	
	Chromic Abruptic Lixisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Hypereutric, Profondic)	LX-ap-cr-ct-df-cen-kop-je-pn	
	Abruptic Alisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Hyperdystric)	AL-ap-cudf-cen-kop-jd	
	Chromic Abruptic Lixisol (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Epiloamic, Hypereutric, Profondic)	LX-ap-cr-ct-df-cen-kop-je-pn	

Figura 3. Unidades de suelo en la Zona Sierra Tabasco, México.

En la PEA todos los suelos tienen una saturación de bases intercambiables $\geq 50\%$ entre el horizonte superficial hasta los 100 cm de profundidad, tienen buena fertilidad, debido al continuo aporte de material aluvial con altos contenidos de materia orgánica, y buena actividad biológica (Palma-López y Cisneros, 2000; Medina-Orozco *et al.*, 2014; IUSS Working Group, 2015; Cabeza *et al.*, 2017). Además, en los Fluvisols (FL) se presenta material flúvico dentro de más de un metro de profundidad debido a la gran cantidad de sedimentos aluviales que aportan los ríos y arroyos de la zona. Otro factor importante para estos suelos es la afectación por exceso de agua, que genera anaerobiosis en los horizontes subsuperficiales y procesos de óxido-reducción debidos al pobre drenaje interno (Figura 3 y 4). Los Fluvisols son suelos muy productivos al ser ricos en nutrientes, por lo que suelen estar ocupados con cultivos semiperennes y cultivos básicos (Salgado-García *et al.*, 2005; Palma-López *et al.*, 2007; Bollo-Manent y Hernández-Santana, 2007; Zavala-Cruz *et al.*, 2016b). Asimismo, los Fluvisols presentan diversidad en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Bedolla-Ochoa *et al.*, 2017), provocada por su continuo aporte de sedimentos aluviales (Zavala-Cruz *et al.* 2016b; Ćirić *et al.*, 2017). Dichos aportes originan que estos suelos presenten texturas Franco-limosas o Franco-arcillo-limosas en los horizontes superficiales, situación que los hacen ligeros y fáciles de trabajar. En los GL sobresale el estancamiento del agua superficial, que en la zona es provocado por el tiempo en el cual el suelo se encuentra saturado con agua superficial estancada, sobre todo en suelos con textura arcillosa o que se ubican en pendientes cóncavas, lo que permite que ocurran condiciones reductoras y, como característica particular, la combinación de colores azulosos y grisáceos, dentro de los agregados, y colores rojizos o amarillentos en los poros y paredes de agregados, donde ambos procesos son indicadores de reducción-oxidación alternados debido a las épocas de lluvias y secas (Gómez *et al.*, 2010; IUSS Working Group, 2015).

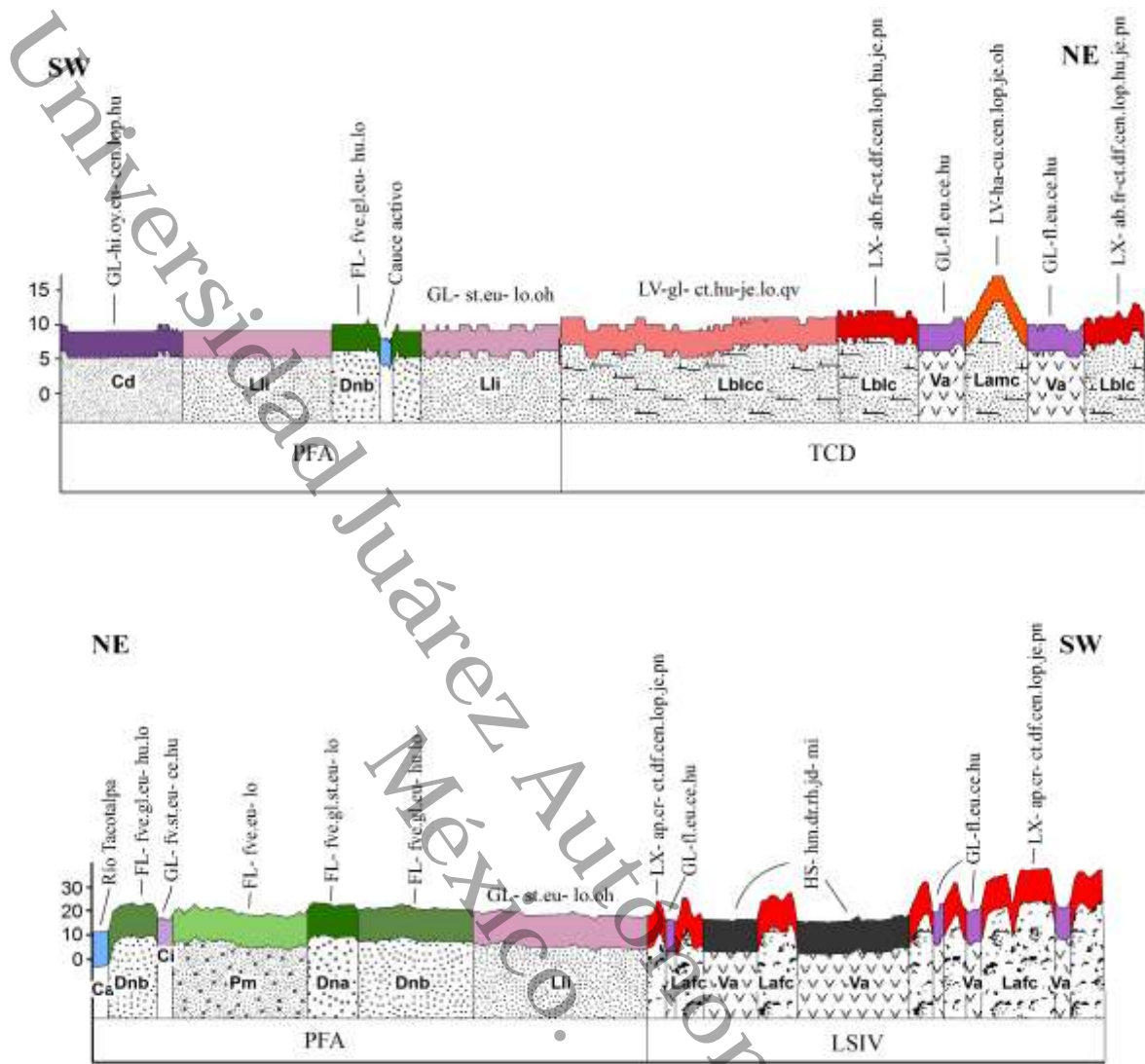


Figura 4. Transectos en la PTTJ, de Suroeste a Noreste y Noreste a Suroeste, representan la relación relieves y unidades de suelo. En el Transecto de Sur-oeste a Nor-este, representa la secuencia de la planicie fluvial y palustre GL/FL; terraza con suelos mejor desarrollo LX/LV. En el Transecto de Nor-este a Sur-oeste trazado en el paisaje de (LSIV), de la parte baja a la cima asocia los grupos de suelo FL/GL y en los lomeríos el grupo LX/ y en los Valles Acumulativos HS/GL.

La terraza costera detrítica (TCD), con geofomas de altitudes bajas y relieves ligeramente convexos a cóncavos, así como los terrenos altos con relieves de moderados a fuertemente convexos, se caracteriza por desarrollar en el horizonte subsuperficial un mayor contenido de arcilla, como resultado de procesos edafogénicos ligados a la migración de arcilla,

presencia de barnices o revestimientos de arcilla y formación del horizonte árgico. Estos suelos son más desarrollados, con horizontes A-B-C, y pertenecen a los Grupos Luvisol (LV), Lixisol (LX) y Alisol (AL). Al respecto, Zavala-Cruz *et al.* (2016a y b) indican que, en el trópico húmedo, estos grupos se caracterizan por presentar horizontes árgicos y revestimientos de arcilla, pH ácido y drenaje de bueno a imperfecto. En los lomeríos con altitudes bajas a altas con relieve convexo es notable la segregación de Fe en los LX y AL, lo que generalmente se acompaña con una pobre agregación de las partículas del suelo en las áreas empobrecidas en Fe y la compactación del horizonte en las zonas enriquecidas en Fe (IUSS Working Group, 2015). En los suelos LV, LX y AL se tienen procesos pedogénicos similares que se evidencian por barnices de arcilla (revestimiento) en el horizonte árgico. Esto es originado por la migración de arcillas hacia los horizontes inferiores, más de 1% de carbono orgánico del suelo en la fracción tierra fina como promedio ponderado hasta una profundidad de 50 cm (debido a la acumulación de materia orgánica en formas húmicas residuales características en los suelos ácidos) y, para el caso del LV, una saturación de bases $\geq 50\%$ en todo el espesor entre 20 y 100 cm de la superficie del suelo. Hay texturas diferenciales al presentarse texturas arcillosas entre los 50 y 100 cm de profundidad, así como texturas francas dentro de los primeros 50 cm de profundidad, propiedades que permiten diferenciar a estos suelos para su uso agropecuario, ya que se presenta compactación debido al incremento de arcilla en los horizontes inferiores. En cada relieve/modelado, la distribución de las unidades de suelo concuerda con la composición de la roca y con los procesos geológicos ocurridos en la región (que han sido modificados por otros factores de formación de suelos, principalmente el relieve y el clima, durante el tiempo en que ha operado el intemperismo). Estas condiciones son evidentes en las terrazas costeras del Golfo de México (Zavala-Cruz *et al.* 2014; Salgado-García *et al.*, 2015; Zavala-Cruz *et al.*, 2016a). El suelo GL del valle acumulativo resultó similar a los GL de la PFA.

Los Lixisols (LX) son los suelos principales de los lomeríos convexos del paisaje LSIV. Al presentarse un clima tropical muy lluvioso sobre los materiales geológicos más antiguos del área de estudio, se ha provocado una fuerte erosión y lixiviación de materiales en los suelos

(Palma-López *et al.*, 2007). Adicionalmente, la zona se asocia a extensiones de pastizales con exceso de pastoreo, lo que provoca en la capa superficial degradación, con baja estabilidad, de los agregados (Salgado-García *et al.*, 2015). En los valles acumulativos similares a los de la TCD se presenta el grupo de suelo GL. Sin embargo, en los valles con condiciones similares a las cubetas de decantación, se forman los Histosols (HS). Este suelo orgánico en los lomeríos resulta inusual debido a que los valles acumulativos en la época actual se inundan por periodos cortos en la época de lluvias y acumulan sedimentos minerales predominantemente. Sin embargo, en el Cuaternario Holoceno estos valles funcionaron como zonas lacustres y palustres, y aunado a las abundantes precipitaciones de la zona, propiciaron la acumulación de materia orgánica y la formación de HS, por lo que podría tratarse de paleosuelos (Figura 3 y 4). En estos suelos existe saturación de agua en el horizonte superficial donde domina el material orgánico (carbono orgánico del suelo $\geq 20\%$) medianamente descompuesto, lo que provoca colores pardo rojizo oscuro y olivo muy oscuro en el material orgánico, lo que indica el ralentizamiento de la descomposición de la materia orgánica. El suelo tiene permeabilidad lenta, por lo que los productores requieren utilizar drenaje artificial para implementar los usos agropecuarios. Sin embargo, se encuentra saturado con agua freática dentro de los 100 cm de profundidad, por lo que la productividad del suelo es baja. Dentro de los Histosols, los suelos (como éste) que presentan pH inferior a 5.5 en las capas orgánicas se consideran como pobres en nutrimentos. Lo anterior se debe principalmente a que la relación carbono/nitrógeno (C/N) en todos los horizontes es muy alta (> 25), lo que indica inmovilización orgánica de N y baja tasa de mineralización neta (IUSS Working Group, 2015; NOM-021-RECNAT, 2000). Esta unidad de suelo no fue reportada en la cartografía de suelos a escala 1:250000, generada en el área de estudio por Ortiz-Pérez *et al.* (2005), Palma-López *et al.* (2007), Zavala-Cruz *et al.* (2011) y Zavala-Cruz *et al.* (2016a). Sin embargo, algunos calificadores han sido reportados en diversos estudios asociados con diferentes usos y ecosistemas por Moreno-Cáliz *et al.* (2004), Arnalds (2004), Covelo *et al.* (2008) y Domínguez-Domínguez *et al.* (2011).

Conclusiones

La zonificación de los paisajes geomorfológicos y de los relieves/modelado a escala semidetallada 1:50000, con enfoque geopedológico, permitió clasificar la variabilidad de las unidades de suelo en la Planicie y Terrazas de Tacotalpa y Jalapa. Se cartografiaron tres paisajes geomorfológicos, planicie fluvial activa, terraza costera detrítica y lomerío suave a inclinado volcánico. Dentro de ellos se diferenciaron 14 relieve/modelados. El 82% de la superficie corresponde al paisaje de planicie fluvial activa, caracterizada por presentar relieves dominantes de diques naturales, playas de meandro, llanuras de inundación y cubetas de decantación, de forma ligeramente convexa con procesos de acumulación de sedimentos aluviales y palustres y pendientes menores a 2%, por lo que están expuestos a inundaciones recurrentes. Los suelos encontrados en estos relieves se muestran plenamente diferenciados: en los relieves planos a cóncavos se desarrollan los Gleysols, con estancamiento de agua durante largos periodos o bien, Gleysols que estuvieron saturados de agua, provocando colores reductimósficos. En los de posición ligeramente convexa el grupo dominante es el Fluvisol; en ellos predominan los depósitos recientes que originan las texturas franco-limosas a franco-arcollo-limosas, desde el horizonte superficial a los subyacente, y presentan, además, estratificación profundas en el perfil de suelo.

En los paisajes de terrazas y lomeríos con basamentos de roca lutita-arenisca y brecha volcánica los suelos más antiguos, ácidos y desarrollados. Predominan los Alisols, Luvisols y Lixisols; todos ellos presentan acumulación iluvial de arcilla que forma un horizonte árgico, con concentraciones residuales de óxidos de hierro y aluminio, así como una estructura subangular. Además, algunos suelos contienen más del 1% de carbono orgánico hasta los 50 cm de suelo y tienen una alta saturación de bases. En los relieves de valles acumulativos, los grupos asociados son los Histosols y Gleysols, con una génesis asociada a las condiciones de anaerobiosis que trae como consecuencia procesos de gleyzación y acumulación de materia orgánica.

Agradecimientos

Al National Science Foundation Partnerships in International Research and Education (NSF), a través del proyecto “Sustentabilidad, Servicios Ecosistémicos y Desarrollo de la Bioenergía en las Américas” (PIRE) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento parcial de este trabajo.

Literatura citada

- Aksoy, E., Louwagie, G., Gardi, C., Gregor, M., Schröder, C., Löhnertz, M., 2017, Assessing soil biodiversity potentials in Europe: Science of The Total Environment, 589, 236-249.
- Arnalds, O., 2004, Volcanic soils of Iceland: Catena, 56, 3-20.
- Barbosa, O.A., Bertani, L.A., Fernandez, F.R., Mendoza, R.P., 2005, Análisis fisiográfico para el levantamiento pedológico semidetallado: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9, 191-198.
- Bautista-Zuñiga, F., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J.J.M., González-Iturbe, J.A., 2004, Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán: Terra Latinoamericana, 22, 243-254.
- Bautista-Zuñiga, F., Frausto, O., Ihl, T., Aguilar, Y., 2015, Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán, México: Enfoque geomorfopedológico y WRB: Ecosistemas y recursos agropecuarios, 2, 303-315.
- Bocco, G., Mendoza, M.E., Priego, A., Burgos, A., 2010, La cartografía de sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial: México, Semarnat, 71 p.

- Bojórquez, I., Hernández, A., García, D., Nájera, O., Flores, F., Madueño, A., Bugarín, R., 2007, Características de los suelos cambisoles y fluvisoles de la llanura costera norte del estado de Nayarit, México: *Cultivos Tropicales*, 28, 19-24.
- Bollo-Manent, M., Hernández-Santana, J.R., 2008, Paisajes físico-geográficos del noroeste del estado de Chiapas, México: *Investigaciones geográficas*, 66, 7-24.
- Buol, S.W., Hole, F.D., McCracken, R.J., 1990, Génesis y clasificación de suelos: México, Trillas, 417 p.
- Brevik, E.C., Calzolari, C., Miller, B.A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., Jordán., 2016, Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions: *Geoderma*, 264, 256-274.
- Cabeza, R.A., Myint, K., Steingrobe, B., Stritsis, C., Schulze, J., Claassen, N., 2017, Phosphorus fractions depletion in the rhizosphere of young and adult maize and oilseed rape plants: *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17, 824-838.
- Castillo, M., Lugo-Hubp, J., 2011, Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término Knickpoint en el léxico geológico-geomorfológico del español: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 353-364.
- Ćirić, V.I., Drešković, N., Mihailović, D.T., Mimić, G., Arsenić, I., Đurđević, V., 2017, Which is the response of soils in the Vojvodina Region (Serbia) to climate change using regional climate simulations under the SRES-A1B?: *Catena*, 158, 171-183.
- Cuanalo de la, C.H., 1990, Manual de descripción de perfiles de suelo en el campo: Chapingo, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, 40 p.
- Covelo, E.F., Vega, F.A., Andrade, M.L., 2008, Sorption and desorption of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn by a Fibric: *Journal of Hazardous Materials*, 159, 342-347.
- Domínguez-Domínguez, M., Zavala-Cruz, J., Martínez-Zurimendi, 2011, Manejo forestal de los manglares de Tabasco: Villahermosa, Tabasco, Colegio de postgraduados, 137 p.

- Escribano, P., Oyonarte, C., Cabello, J., Zinck, J.A., 2016, Ecological land zonation using integrated geopedologic and vegetation information: Switzerland, Case study of the Cabo de Gata-Níjar Natural Park, Almería, Spain, in Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., Del Valle, H.F., (eds.), *Geopedology*: Springer, 475-487.
- Esfandiarpour, I.B., Salehi, M.H., Toomanian, N., Mohammadi, J., 2009, The effect of survey density on the results of geopedological approach in soil mapping: A case study in the Borujen region, Central Iran: *Catena*, 79, 18-26.
- Esfandiarpour, I.B., Mohammadi, J., Salehi, M.H., Toomanian, N., Poch, R.M., 2010, Assessing geopedological soil mapping approach by statistical and geostatistical methods: A case study in the Borujen region, Central Iran: *Catena*, 82, 1-14.
- Environmental System Research Institute (ESRI), 2004, ArcGis 9. What is ArcGis?: Redlands, Environmental System Research Institute, 119 p.
- Farshad, A., 2013, Geopedology reports historical changes in climate and agroecology: a case study from Northwestern Iran: *ECOPERSIA*, 1, 145-158.
- García-Sancho, A.G., Bojórquez-Serrano, J.I., Nájera-González, O., García-Paredes, J.D., Madueño-Molina, A., Flores-Vilchez, F., 2009, Regionalización ecológica de la llanura costera norte de Nayarit, México: *Investigaciones geográficas*, 69, 21-32.
- Garnica-Peña, R.J., Alcántara-Ayala, I., 2004, Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz: *Investigaciones geográficas*, 55, 23-45.
- Gómez, I.A., Hernández, A., Ascanio, M.O., Sánchez, M.E., Durán, J.L., Benítez, L., Villegas, R., Ponce de León, D., López, M., 2010, Grupos de suelos y su distribución en las áreas del ingenio central Motzorongo, Veracruz, México: *Cultivos Tropicales*, 31, 32-36.
- Harmand, D., Adamson, K., Rixhon, G., Jaillet, S., Losson, B., Devos, A., Hez, G., Calvet, M., Audra, P., 2017, Relationships between fluvial evolution and karstification

- related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions: *Quaternary Science Reviews*, 166, 38-56.
- Hartemink, A.E., Bockheim, J.G., 2013, Soil genesis and classification: *Catena*, 104, 251-256.
- Hernández-Jiménez, A., Vera-Macías, L., Naveda-Basurto, C.A., Guzmán-Cedeño, A.M., Vivar- Arrieta, M., Zambrano, T.R., Mesías-Gallo, F., Ormanza, K., León-Aguilar, R.V., López-Alava, G.A., 2017, Variaciones en algunas propiedades del suelo por el cambio de uso de la tierra en las partes media y baja de la microcuenca membrillo, Manabí, Ecuador: *Cultivos Tropicales*, 38, 50-56.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 1989, Manual de clasificación, cartografía e interpretación de suelos con base en el sistema de taxonomía de suelos: Cuernavaca, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 297 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2011a, Ortofotomapas E15d11f, E15d11e, E15d21a, E15d21b, E15d21c, E15d21d, E15d21e1 y E15d21f, escala 1:50000: Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2011b, Modelo digital de elevación, escala 1:50000: San Luis Potosí, disponible en <<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental//Descargas.aspx>>, consultado el 30 de Junio de 2013.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2016, Anuario estadístico y geográfico de Tabasco, 2016: México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 461 p.
- IUSS Working Group (WRB), 2015, World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015, International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps: *World Soil Resources Reports*, n. 106: Rome, 192 p.
- Kemp, J., Pietsch, T., Gonzt, A., Olley, J., 2017, Lacustrine-fluvial interactions in Australia's Riverine Plains: *Quaternary Science Reviews*, 166, 1-11.

- Lanza, E.G. de la, Ortiz-Pérez, M.A., Carbajal-Pérez J.L., 2013, Diferenciación hidromorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del mar Caribe: *Investigaciones Geográficas*, 81, 33-50.
- López-Castañeda, A., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Ortiz-Solorio, C.A., Tinal-Ortiz, S., Valdez-Lazalde, J.R., 2017, Cartografía de los suelos en la región de Los Ríos, Tabasco, México: uso del modelo digital de elevación: *Agroproductividad*, 10, 22-28.
- Martín-Vide, J.P., 2015, Restauración del Río Besòs en Barcelona. Historia y lecciones aprendidas: *Revista Iberoamericana del Agua*, 2, 51-60.
- Martínez-Villegas, N., 2007, An overview of different soil classification systems used in Mexico: *Terra Latinoamericana*, 25, 357-362.
- Medina-Orozco, L.E., García-Calderón, N.E., García-Oliva, F., Ikkone, E., 2014, Suelos de Humedales del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México: *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5, 111-124.
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2014, The historical role of base maps in soil geography: *Geoderma*, 230-231, 329-339.
- Moreno-Cáliz, E., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Guerrero-Peña, A., Ortiz-Solorio, C.A., Palma-López, D.J., 2004, Micromorfología en la clasificación de Histosoles en humedales de Tabasco, México: *Terra Latinoamericana*, 22, 153-160.
- Munsell, 2000, Munsell soil color charts: Baltimore, US Department of Agriculture, 29 p.
- Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT), 2000, Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario oficial de la federación: México, Semarnat 85 p.
- Ortiz-Pérez, M.A., Siebe, C., Cram, S., 2005, Diferenciación ecogeográfica de Tabasco, en Bueno, J., Álvarez, F., Santiago, S. (eds.), *Biodiversidad del Estado de Tabasco: México*, Conabio e Instituto de Biología de la UNAM, 305-322.

- Paladino, I.R., Irigoien, J., Moretti, L., Civeira, G., 2017, Relaciones Geopedológicas y análisis multivariado de los atributos edáficos asociados a las dunas longitudinales del noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina: Revista de la Asociación Geológica Argentina, 74, 373-383.
- Palma-López, D.J., Cisneros, D.J., 2000, Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco: Villahermosa, Fundación Produce Tabasco, vol. I, 115 p.
- Palma-López, D.J., Cisneros, D.J., Moreno, C.E., Rincón-Ramírez, J.A., 2007, Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable: Villahermosa, Colegio Postgraduados ISPROTAB-FUPROTAB, 184 p.
- Palma-López, D.J., Zavala, C.J., Bautista, Z.F., Morales, G.M.A., López, C.A., Shirma, T.E.D., Gallegos, T.J., 2012, Estudio sobre el plan de uso sustentable de los suelos del estado de Campeche: San Francisco de Campeche, Colegio de Postgraduados, Secretaría de Desarrollo Rural de Campeche, reporte técnico, 141 p.
- Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Bautista-Zuñiga, F., Morales-Garduza, M.A., López-Castañeda, A., Shirma-Torres, E.D., Sánchez-Hernández, R., Peña-Peña, A., Tinal-Ortiz, S., 2017, Clasificación y cartografía de suelos del estado de Campeche, México: Agroproductividad, 10, 71-78.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Poch, R.M., 2013, Edafología. Uso y Protección de suelos: Madrid, España, Mundi-Prensa, 608 p.
- Ramos-Reyes, R., Zavala-Cruz, J., Gama-Campillo, L.M., Pech-Pool, D., Ortiz-Pérez, M.A., 2016, Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 68, 581-598.
- Romo, M. de L., Ortiz-Pérez, M.A., 2001, Riesgo de inundación en la llanura fluvial del curso bajo del río San Pedro, Nayarit: Investigaciones Geográficas, 45, 7-23.

- Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Lagunes-Espinoza, L.C., Ortiz-García, C.F., Ascencio-Rivera, J.M., 2005, Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México: *Interciencia*, 30, 395-403.
- Salgado-García, S., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Lagunes-Espinoza, L.C., Córdova-Sánchez, S., Castelán-Estrada, M., Ortiz-García, C.F., Rincón-Ramírez, J.A., 2015, Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en Palma de aceite (SIRDF): Región Ríos de Tabasco: Cárdenas, Tabasco, Grupo SIRDF PA-LPi: AESS, Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, 118 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2008, Carta geológico-minera: Estados de Chiapas y Tabasco, escala 1: 500 000: Pachuca, México.
- Soil Survey Staff, 2014, Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys: Natural Resources Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, 399 p.
- Solís-Castillo, B., Ortiz-Pérez, M.A., Solleiro-Rebolledo, E., 2014, Unidades geomorfológico-ambientales de las tierras bajas mayas de Tabasco-Chiapas en el río Usumacinta: un registro de los procesos aluviales y pedológicos durante el Cuaternario: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 279-290.
- Zavala-Cruz, J., Castillo, A.O., Ortiz, C.A.I., Palma-López, D.J., Juárez, L.J.F., Salgado-García, S., Rincón-Ramírez, J.A., Moreno, C.E., Ramos, R.R., 2009, Capacidad de uso del suelo urbano en Tabasco, con base en el suelo, uso actual y vegetación: Tabasco, Colegio de Postgraduados, Secretaría de Asentamientos y Obras Públicas, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, 204 p.
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, D.J., Fernández, C.C.R., López, C, A., Shirman, T.E., 2011, Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco: Villahermosa, Tabasco, Colegio de Postgraduados, 90 p.
- Zavala-Cruz, J., Palma-López, D.J., Morales, G.M.A., 2012, Clasificación de suelos de la cuenca baja del río Tonala, Tabasco, en Zavala, C.J. y García, L.E. (eds.), *Suelo y*

- vegetación de la cuenca baja del Río Tonalá, Tabasco: Cárdenas, Tabasco, Colegio de Postgraduados, 142 p.
- Zavala-Cruz, J., Salgado-García, S., Marín-Aguilar, A., Palma-López, D.J., Castelán-Estrada, M., Ramos, R.R., 2014, Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco: Ecosistemas y recursos agropecuarios, 1, 123-137.
- Zavala-Cruz, J., Jiménez-Ramírez, R., Palma-López, D.J., Bautista-Zuñiga, F., Gavi-Reyes, F., 2016a, Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México: Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 3, 161-171.
- Zavala-Cruz, J., Morales-Garduza, M.A., Vargas-Villamil, L.M., Palma-López, D.J., Ortíz-Solorio, C.A., 2016b, Capacidad de uso del suelo urbano en planicies fluviales costeras: El caso de Villahermosa, Tabasco, México: Interciencia, 41, 296-304.
- Zinck, J.A., 1989, Physiography and soil. Lecture notes for soil students. Soil Science Division, Soil survey courses subject matter: Enschede, The Netherlands, ITC, 161 p.
- Zinck, A.J., 2012, Geopedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales: Enschede, The Netherlands, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, 123 p.

CAPITULO 4

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EDÁFICO EN DIFERENTES AGROSISTEMAS EN TABASCO, SURESTE DE MÉXICO

Brindis-Santos, Alfredo Isaac^{1,4}; Palma-López, David Jesús^{2*}; Sánchez-Hernández, Rufo³; Mata-Zayas, E.E⁴,
Valdés-Velarde, Eduardo⁵., Gallardo Lancho Juan Fernando⁶

^{1,4}Facultad Maya de Estudios Agropecuarios, Universidad Autónoma de Chiapas, Carretera Catazajá-Palenque Km 4 C.P. 29980, Catazajá, Chiapas.

²Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N, C.P. 86500, H. Cárdenas, Tabasco, México.

³División Académica de Ciencias Agropecuarias, UJAT, Carretera Villahermosa-Teapa Km. 25 R/A La huasteca Segunda Sección Villahermosa, Tabasco, C.P. 86280.

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.

⁵Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma de Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Texcoco de Mora. C.P. 56230.

⁶C.S.I.C., Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (España).

*Autor correspondencia: dapalma@colpos.mx

Resumen

Se estimó el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), nitrógeno total edáfico (NTS) y calculó la relación C/N en *Luvisols* y *Lixisols*, cultivados con palma de aceite (PA) de diferentes edades (5, 8 y 18 años), pastizales (PZ20) y bosques secundarios (BS20). Los suelos se caracterizaron por presentar pH de moderada a fuertemente ácidos. El contenido de COS es bajo, localizado principalmente a -20 cm de profundidad. La relación $C/N \leq 14,0$

que presentan los suelos generan alta susceptibilidad de producir flujos de C al suelo por la degradación de residuos orgánicos. El contenido de COS -60 cm de profundidad oscilo entre 51 y 52 Mg C ha⁻¹ en los sistemas PA de 5 y 18 años respectivamente, mientras que el PA de 8 años es de 45 Mg C ha⁻¹. Los agrosistemas de PZ20 y BS20 obtuvieron contenidos de COS entre, respectivamente, 130 y 214 Mg C ha⁻¹ siendo ambos los de significativamente mayor almacenamiento de COS. Las plantaciones de palma de aceite mostraron un reducido potencial de C capturado en el suelo en comparación con el BS20.

Palabras clave: *Elaeis guineensis* Jacq, pastizales, bosques secundarios, cambio de uso de suelo, suelos del ambiente tropical.

Abstrac

The contents of soil organic carbon (COS), nitrogen (SNT) and C/N ratio in Luvisols and Lixisols cultivated with oil palm (PA) of different ages (5, 8 and 18 years), grasslands (PZ20) and secondary forests (BS20), were estimated. The soils were characterized by presenting moderate to strongly acidity. The SOC content is low, located mainly at -20 cm deep. The soil C/N ratio ≤ 14.0 calculated generates high susceptibility to produce C flows to soil, due to the degradation of the organic residues. At -60 cm deep, the SOC content between 51 and 52 Mg C ha⁻¹ in the PA systems of 5 and 18 years, respectively, while that of the 8-year-old PA had a SOC content of 45 Mg C ha⁻¹. The PZ20 and BS20 systems obtained SOC contents ranging between, respectively, 130 and 214 Mg C ha⁻¹, both being the significantly largest storage of SOC. Oil palm plantations showed a reduced potential of C sequestration by soil compared to the BS20.

Keywords: *Elaeis guineensis* Jacq, grasslands, secondary forests, land use change, tropical systems.

Introducción

El suelo es el principal reservorio de carbono (C) de los ecosistemas terrestres y, a su vez, la mayor fuente de bioóxido de carbono CO₂ atmosférico, el cual retorna a la atmósfera a través del proceso llamado respiración microbiana (Palacio y Hurtado, 2008). El 75 % del C de los ecosistemas terrestres se encuentra en el suelo (como C orgánico, COS) y se estima que a escala del Planeta, referido a -1,00 m de profundidad, se encuentra una cantidad de 1.500 Pg de C (Robert, 2002; Cerri, 2006); de tal cantidad entre el 39-79 % se localiza en los primeros -30 cm, mientras que entre el 58-81% a -50 cm de profundidad (Batjes, 1996). De acuerdo con Rantao *et al.* (2014) el contenido de COS en algunos suelos decrece al profundizar en la secuencia de los horizontes genéticos (O/A/B/C), oscilando entre el 16 % en la capa O a 0.27% en el horizonte C.

La principal causa en los cambios de uso del suelo son las actividades antropogénicas; en zonas tropicales la agricultura intensiva es la causa de la pérdidas de aproximadamente 20-80 Mg C ha⁻¹ (Lal, 2004; Laurence *et al.*, 2014; Olson *et al.*, 2014).

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es uno de los cultivos perennes más productivos, pues alcanza rendimientos de hasta 40 Mg racimos de fruta fresca ha⁻¹; ello ha provocado un acelerado crecimiento de la superficie cultivada, con implicaciones directas en el contenido y ciclo específico del COS (Lamade *et al.*, 2009; Goodrick *et al.*, 2015). Se han desarrollado en Asia y Sudamérica diversos trabajos de investigación en relación con esta oleaginosa (palma aceitera, PA) para determinar los contenidos de COS asociados a este cultivo comparándolo con otras plantaciones tropicales café (*Coffe arabica*), banano (*Musa* sp.), sábila (*Aloe vera*), cacao (*Theobroma cacao*) y melina (*Gmelina arborea*) (Vásquez-Polo *et al.*, 2011; Kimura *et al.*, 2012; Frazao *et al.*, 2014; de Carvalho *et al.*, 2014; Pauli *et al.*, 2014; Goodrick *et al.*, 2015). De acuerdo con Ajiboye *et al.* (2015) *E. guineensis* Jacq. es capaz de capturar C si el suelo no se perturba durante, al menos, 20 años. Investigaciones realizadas en Brasil estimaron ganancias de COS entre 34,7 y 66,0 Mg C ha⁻¹ en los -30 cm superficiales del suelo en plantaciones de 23 y 34 años, respectivamente; lo que indica aumento significativo de las reservas de COS en plantaciones de *E. guineensis* Jacq. en un periodo mayor a 30 años (Frazao *et al.*, 2014).

En Tabasco (México) los cambios de uso de suelo durante 1940 a 1996 fueron principalmente áreas boscosas, por lo que en el Estado se perdió el 95 % de la superficie de bosque tropical (Zavala y Castillo, 2002); las sustituciones fueron principalmente por áreas de pastizales, agrícolas, urbanas y campos petroleros (Tudela, 1990; Sánchez y Barba, 2005). Específicamente en la denominada región de la Sierra, entre los años de 1973 a 2003, se perdió el 80 % de la selva alta perennifolia, debido principalmente a incendios, dando como resultado la ampliación de áreas de bosques secundarios, pastizales y sistemas agrícolas (Salazar-Conde *et al.*, 2004). Durante la primera década del siglo XXI la cobertura de suelo en la zona se distribuía como sigue: 16,0 % de selva perennifolia; 10,0 % de bosque secundario; 10,6 % de agricultura de plantación y de temporal; 7,7 % vegetación hidrófila; y 51,2 % de uso en pastizales (Rullán-Silva *et al.* 2011).

En el Sureste mexicano se encuentra una superficie establecida de 1.017,53 km² de *E. guineensis* Jacq., de las cuales Tabasco aporta el 21 % de la producción nacional, ocupando el tercer sitio como productor en el país (SIAP, 2019). Este agrosistema tropical (AST) tiene una vida económica de 25 a 30 años, en cuyo momento la biomasa total (aérea y suelo) generan en promedio 100 ton MS ha⁻¹, lo que representa alrededor de 50 Mg C ha⁻¹ (Henson, 2004; Smith *et al.*, 2012). Sin embargo, a pesar del incremento en la superficie en el país de este cultivo y los avances en la investigación en el estado de Tabasco no se encuentran aproximaciones sobre el potencial de almacenamiento de COS del AST de palma de aceite, específicamente en lo que corresponde al cambio de uso de suelo como consecuencia de la instalación del cultivo de la PA.

Por lo expuesto, los objetivos de este trabajo fueron cuantificar el almacenamiento de C, nitrógeno (N) y relación C/N en tres AST (palma de aceite en diferentes edades y pastizales) comparándolo con bosques secundarios en la Región Sierra de Tabasco) para explicar el potencial de almacenamiento de C en agrosistemas tropicales en el Estado de Tabasco (México).

Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la Región Sierra de Tabasco (México), específicamente en los municipios de Jalapa y Tacotalpa, al sur del Estado de Tabasco (Fig. 1), ubicados en la provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur. Los sitios de muestreo se ubicaron dentro de una extensión de 7.080 ha entre las coordenadas 17° 31' 57" y 17° 47' 44" N y 92° 42' 55" y 92° 54' 22" O (Fig. 1).

Clima. - El clima se caracteriza por ser cálido-húmedo, con abundantes lluvias en verano Am (f) en Jalapa y cálido-húmedo con lluvias todo el año Af(m) en Tacotalpa según la clasificación de Köppen. La temperatura media es de 26 °C (sin heladas) y la precipitación media de 2,000 a 4,000 mm año⁻¹.

Hidrología. - La hidrología está conformada por la parte media y baja de las cuencas de los ríos Grijalva, Teapa y Tacotalpa (Palma-López *et al.*, 2007).

Geomorfología. - La geomorfología que se asocia a los sitios de nuestro estudio corresponde a paisajes de Terrazas y Lomeríos, dominados por procesos de erosión e intemperización, sobre rocas sedimentarias detríticas y brecha andesítica de edad oscilante entre Terciario (Paleoceno) y Cuaternario (Pleistoceno), con alturas oscilantes entre 7,0 y 70 m s.n.m. (Zavala-Cruz *et al.*, 2016.)

Suelos. - Los suelos asociados a los sitios de estudio se caracterizan por desarrollar horizontes A-B_t-C; el horizonte subsuperficial (B_t) posee mayor contenido de arcilla, con presencia de barnices o revestimientos arcillosos y formación del horizonte *árgico*. Por tanto, estos suelos corresponden a los grupos *Luvisoles* (LV) y *Lixisoles* (LX) (Brindis-Santos *et al.*, 2020).

Vegetación. - De acuerdo con Sánchez-Munguía (2005) la vegetación natural dominante en el área corresponde a bosques secundarios (BS), tras haber quedado sin uso agrícola (con vegetación de condición permanente, como el plátano *Musa paradisiaca* L. y el cacao *Theobroma cacao* L.) o ganadero después de 10 años. Se observan áreas de pastos remolino (*Paspalum notatum* F.), estrella de África (*Cynodon* sp. P.) y zacate gigante (*Pennisetum purpureum* S.) dedicados a la ganadería extensiva, así como de cultivos anuales como maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.); también se observan

cambios de uso de selva media y alta perennifolia a plantaciones forestales de cedro (*Cedrela odorata* L.), bojón (*Cordia alliodora*), caoba (*Swietenia macrophylla* K.), teca (*Tectona grandis* L.), melina (*Gmelina arborea* L.) y palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Salazar-Conde *et al.*; 2004).

Estrategia de muestreo.

Se seleccionaron sitios en tres agrosistemas: Palma de aceite (PA, de diferentes edades), pastizales permanentes (PZ) y bosques secundarios (BS); la edad del cultivo de palma de aceite (PA) fue reportada por los productores. Las plantaciones de PA fueron sembradas con un diseño en tres bolillos (Fig. 2) y a una distancia de 9 m entre planta, formando un triángulo equilátero con una densidad de siembra de 143 plantas de palmas de aceite ha⁻¹, las cuales se encuentran establecidas donde antes se tenían pastos cultivados.

Se consideraron cinco sitios diferentes (tratamientos): Plantaciones de PA de 5 años (PA5), 8 años (PA8) y 18 años (PA18); pastizales permanentes de 20 años (PZ20) y bosques secundarios de 20 años (BS20); se seleccionaron cuatro parcelas (repeticiones) por cada tratamiento. Los tratamientos PA con diferentes edades se compararon con el tratamiento (PZ20, dado que es el uso más extendido en la zona) y como referencia (control) se muestrearon sitios asociados a bosques secundarios (BS20; debido a la ausencia de selva).

En los tratamientos PA se muestrearon (Fig. 2) en el área de goteo (AG; en un radio de 0,60 m de distancia horizontal del estípite de la plata), bajo la fronda que queda después de la cosecha de los racimos (BF; a 2,00 m de distancia del estípite de la planta); y entre filas de las palmeras (SF; a 2,50 m del estípite). Con respecto al área total cultivada de una hectárea de palma de aceite en Tabasco, el 13,3 % corresponde al AG, 44,4 % del BF y 42,2 % del SF. Los cultivos se refieren siempre a una superficie de una hectárea (10.000 m²).

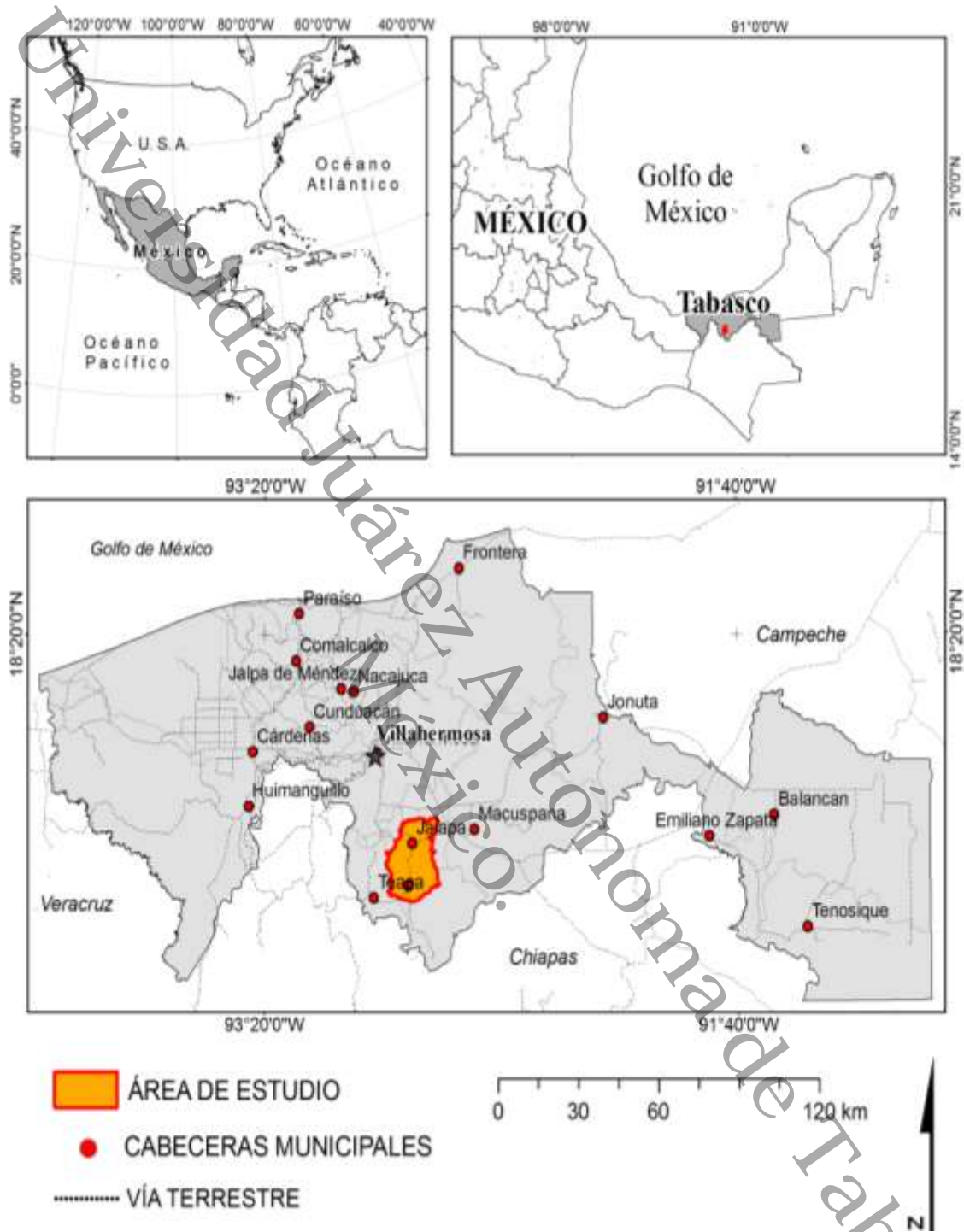
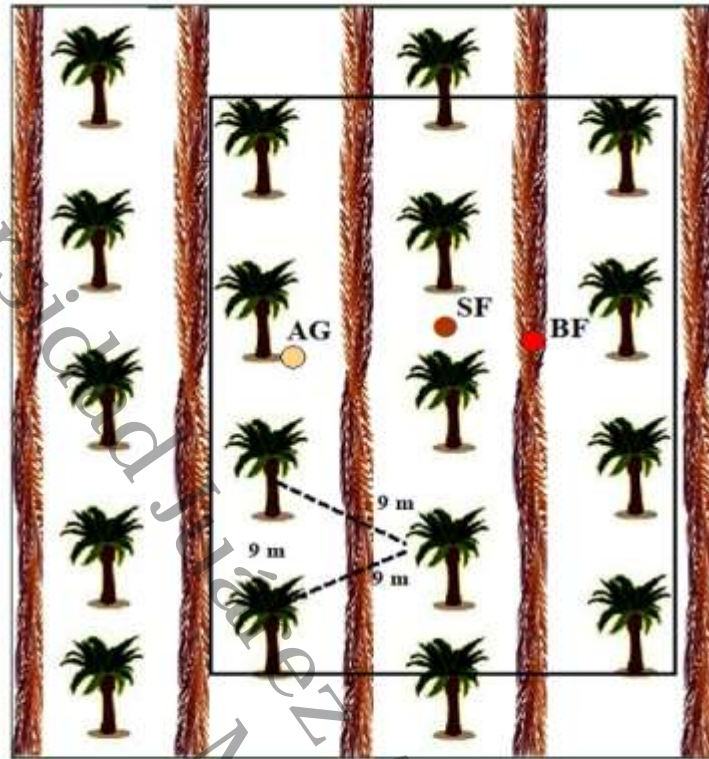


Figura 1. Mapa del área de estudio en la Región Sierra de Tabasco, México.

Evaluación de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Los suelos se muestrearon en los meses de junio-julio de 2016 (temporada de secas). Por cada unidad experimental, se seleccionó una superficie de muestreo de 1.200 m² (20 x 60 m²) (Cerdeira *et al.*, 2013). En total se tomaron dos series de 72 muestras respectivamente, considerando profundidades y tratamientos; la estratificación del muestreo consistió en tres profundidades (0-20 cm; 20-40 cm y 40-60 cm; Rugnitz *et al.*, 2009; Etchevers *et al.*, 2015; PMC, 2015). La primera serie de muestras se secaron al aire y a la sombra, se trituraron y tamizaron a través de una malla de 2 mm para posteriormente determinar la textura por el método de Bouyoucos (Day, 1965). Una parte de esta serie de muestras se utilizó para los análisis de COS y NTS; para ello a esta fracción de muestras se les retiraron piedras y fragmentos de raíces según lo establece la metodología propuesta por Etchevers *et al.* (2015); los análisis se determinaron mediante un equipo *Perkin-Elmer 2410* serie II de C elemental, con horno a 950 °C. La segunda serie de muestras se tomaron con un cilindro de volumen conocido para la calcular la densidad aparente (D_{ap} ; Blake y Hartge, 1986); para ello, el contenido de suelo contenido en el cilindro se secó en estufa de aire forzado a 105 °C hasta lograr un peso constante; para determinar la D_{ap} se dividió el peso seco de la muestra entre el volumen del cilindro. El valor de la D_{ap} se utilizó para transformar los resultados de C obtenidos en porcentajes a valores absolutos de COS ($Mg\ C\ ha^{-1}$).



● AG= en un radio de 0,60 m del estipite de la planta ; ● BF= bajo fronda a 2 m del estipite de la planta y ● SF= entre filas 2.5 m del estipite.

Figura 2. Diseño de muestreo de suelo en plantaciones de palma de aceite, en Tabasco, México.

Análisis estadístico.

El análisis estadístico de los datos se realizó en un diseño de muestreo completamente aleatorizado, con la suposición de que el historial de uso de la tierra será el único efecto dominante en COS, ya que todos los sitios tienen condiciones de relieve, edáficas y climáticas similares. Los datos se analizaron a través de análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), y se utilizó el paquete estadístico SAS para Windows, versión 6.12.

Resultados

Propiedades físicas de los diferentes sistemas de estudio.

Los AST de PA5, PA8 y PA18, así como el PZ20 y BS20 (tratamiento control) de Tabasco (México) presentan texturas franco-arcillosa en los primeros -20 cm de profundidad; pero a partir de la capa 20-60 cm dominan las partículas finas arcillosas, formando un horizonte *árgico*. Todos estos suelos se asocian a un ambiente tropical con abundantes lluvias todo el año, formados por procesos intemperización (a veces con posterior erosión), originándose una acumulación iluvial de arcilla en subsuperficie (horizontes B_t), por lo que se genera una fuerte estructura subangular (Tabla 1).

La variable de D_{ap} aumenta significativamente ($p \leq 0,05$) conforme se profundiza en el suelo; aunque la D_{ap} se mantiene constante en la capa edáfica de 0-60 cm de profundidad (Tabla 1). Por su parte, los agrosistemas de PA8 y PZ20 son los que muestran los menores contenidos de COS y NTS, observándose el mismo comportamiento al aumentar la profundidad del suelo con relación a la variable de D_{ap} (Tablas 1).

Tabla 1. Propiedades físicas de los suelos en la zona Sierra Tabasco, México.

AST	Area	0-20 cm				20-40 cm				40-60 cm				CT	
		A	L	R	Dap	A	L	R	Dap	A	L	R	Dap		
		------(%)-----				------(%)-----				------(%)-----					
		(Mg m ⁻³)				(Mg m ⁻³)				(Mg m ⁻³)					
PZ20		41±6ab	39±4a	20±4e	1.4±0.2a	34±6a	33±7ab	32±7bc	1.5±0.2ab	31±6ab	25±12ab	43±12b	1.5±0.3abc	Fra	
PA5	AG	42±7ab	32±6ab	26±7bcde	1.3 ± 0.1a	35±3a	36±7a	28±9bc	1.4±0.1b	30±9ab	29±3a	41±8b	1.3±0.1bc		
	BF	35±8ab	40.25±6a	25±6cde	1.2±0.1a	34±7a	35±4ab	31±12bc	1.3±0.2b	29±8ab	30±7a	41±7b	1.3±0.1bc	Fra	
	SF	40±7ab	37±4a	23±7de	1.2±0.04a	37±6a	36±9a	26±7c	1.5±0.1ab	28±4ab	30±9ab	41±9b	1.3±0.0bc		
PA8	AG	44±4a	19±3c	37±2ab	1.4±0.04a	27±8a	22±11ab	50±14a	1.5±0.1ab	21±8b	14±7bc	64±7a	1.6±0.1ab		
	BF	40±4ab	26±8bc	34±6abcd	1.3±0.2a	27±8a	23±11ab	49±5a	1.5±0.0ab	33±4ab	14±6bc	53±6ab	1.5±0.1abc	Fra	
	SF	34±14ab	20±6c	45±16a	1.4±0.1a	32±8a	20±7b	50±10a	1.6±0.1ab	29±8ab	17±9abc	52±9ab	1.5±0.1abc		
PA18	AG	31±5b	35±9ab	35±5abc	1.4±0.2a	30±7a	26±18ab	43±18ab	1.5±0.3ab	25±6ab	20±8abc	54±8ab	1.5±0.0abc		
	BF	38±4ab	32±5ab	30±2bcde	1.3±0.2a	33±4a	34±8ab	33±5bc	1.5±0.3ab	32±7ab	19±9abc	49±9b	1.5±0.3abc	Fra	
	SF	33±3ab	38±2a	29±2bcde	1.3±0.2a	37±6a	22±15ab	41±10abc	1.5±0.2ab	36±2 ^a	12±9c	53±4ab	1.7±0.2a		
BS20		31±6b	38±4a	31±9bcde	1.3±0.1a	38±2a	23±7ab	39±8abc	1.6±0.0a	27±7ab	28±2a	45±2b	1.7±0.1a	Fra	

Los valores representan las medias (n= 4) ± desviación estándar. La media entre las áreas de muestreo (AG= área de goteo; BF= bajo fronda; SF= Sin fronda) en el mismo tratamiento y profundidad seguida de la misma letra no son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). AST= Agrosistemas tropicales; PA5= Palma de aceite de cinco años; PA8= Palma de aceite de 8 años; PA18= Palma de aceite de 18 años; BS20= Bosques secundarios y PZ20= Pastizales. A=arena, L=limo, R=arcilla; CF=clasificación textural, Fra=franco arcilloso y Dap= densidad aparente del suelo.

El pH de los suelos agrosistemas estudiados en el sureste, Tabasco, (México).

El análisis de varianza y la prueba de medias del pH en la zona Sierra de, Tabasco (México; Tabla 2) muestran que PA18 años y PZ20 difieren significativamente en el valor de pH a la profundidad edáfica de 0-20 cm ($p \leq 0,05$) con respecto a los otros AST estudiados; mientras que a la profundidad de 0-40 cm PA18, PZ20 y BS20 son significativamente diferentes al resto de los AST evaluados ($p \leq 0,05$); finalmente, los valores de pH de la última profundidad evaluada (40-60 cm) dan resultados estadísticamente ($p \leq 0,05$) similares a los de la profundidad anterior (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis Estadístico del pH del suelo en agrosistemas tropicales en la zona Sierra de Tabasco.

Agrosistemas tropicales	Area	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
		pH en agua (1:2)		
PZ20		5.45±0.15a	5.33±0.10a	4.99±0.04c
PA 5	AG	4.98±0.11bc	4.92±0.10bc	4.92±0.05bc
	BF	4.94±0.09c	4.86±0.18c	4.88±0.09bc
	SF	5.0±0.18bc	4.90±0.23bc	4.88±0.14bc
PA 8	AG	5.0±0.13bc	4.86±0.14c	4.79±0.19d
	BF	5.12±0.12bc	4.92±0.03bc	4.80±0.08d
	SF	5.06±0.14bc	4.98±0.10bc	4.88±0.13bc
PA 18	AG	5.45±0.22a	5.35±0.16a	5.26±0.21a
	BF	5.48±0.16a	5.28±0.11a	5.10±0.06ab
	SF	5.55±0.21a	5.32±0.11a	5.13±0.09ab
BS20		5.20±0.19b	5.08±0.07a	5.17±0.06ab

Los valores representan las medias ($n= 4$) \pm desviación estándar. La media entre las áreas de muestreo (AG= área de goteo; BF= bajo fronda; SF= Sin fronda) en el mismo tratamiento y profundidad seguida de la misma letra no son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). ATS=Agrosistemas tropicales; PA5= Palma de aceite de cinco años; PA8= Palma de aceite de 8 años; PA18= Palma de aceite de 18 años; BS20= Bosques secundarios y PZ20= Pastizales.

Contenidos de COS y NTS en agrosistemas tropicales en la zona Sierra, Tabasco.

La cronosecuencia en los AST de *E. guineensis* Jacq. de PA5, PA8 y PA18 tras un sistema de pastizal (PZ20) y, como control, el bosque secundario (BS20) muestran valores de COS y NTS con diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$) significativas entre tratamientos (Tabla 3), en las tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) de muestreo en el suelo. Se puede observar que los AST PA5 y PA18 también difirieron significativamente con contenidos de COS y NTS más altos ($p \leq 0,05$) que los de PA8; por su parte, las áreas de AG y el BS20 presentan valores medios de COS y NTS de los AST evaluados; además, el agrosistema PZ20 posee contenidos de COS y NTS significativamente bajos respecto a los demás; pero quien presenta los valores más bajos es el PA8, tanto para porcentajes de COS como de NTS (Tabla 3). El significativamente mayor contenido de COS y NTS se obtuvo en el área BF en PA18. Lo anterior quedó de manifiesto por los bajos porcentajes de COS y NTS observados en el área SF con respecto a las parcelas PA5 y PA18. Por su parte, en el área AG los porcentajes de COS y NTS son estadísticamente similares a los observados en el área BF para los agrosistemas de PA5 y PA18.

En la profundidad de 0-20 cm se registraron los mayores porcentajes significativos de COS y NTS, llegando en algunos casos a triplicar los porcentajes observados en las capas subyacentes más profundas del suelo (Tabla 3); en todos los casos se observa que conforme aumenta la profundidad los contenidos de COS y NTS disminuyen gradualmente. Por su parte, los agrosistemas de PA8 y PZ20 son los que muestran significativamente valores menores en porcentajes de COS y NTS.

La misma Tabla 3 muestra la relación C/N en los agrosistemas de PA5, PA8 y PA18, así como los tratamientos de PZ20 y BS20. En la profundidad de 0-20 cm los AST de PA5, PA8 y PA18 en las áreas de AG y SF presentan relaciones de C/N estadísticamente similares ($p \leq 0.05$), excepto en el área BF de las PA8 años que presentan la mayor relación de C/N; mientras que las más bajas relaciones de C/N se hallaron en los AST de PA8, en el

área AG y el PZ20. Se observa que el tratamiento control BS20 presentó una relación C/N estadísticamente similar ($p \leq 0.05$) a los AST de PA5, PA8, y PA18, mientras que, el agrosistema PZ20 tiene la relación C/N más baja de todos los agrosistemas evaluados (Tabla 3). En las capas de suelo más profundas, se observa que los AST de PA5, PA8 y PA18, así como el BS20 y el PZ20, no muestran diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con respecto a la relación C/N. (Tabla 3).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Tabla 3. Características químicas de los suelos tropicales en la Región Sierra de Tabasco (México)

AST	Área	0 - 20 cm			20 - 40 cm			40 - 60 cm		
		C	N	C/N	C	N	C/N	C	N	C/N
		----- (%) -----			----- (%) -----			----- (%) -----		
PZ20		2,1±0,26bc	0,18±0,05bcd	12 ±1,1bc	1,1±0,12bc	0,09±0,02c	13±2,0a	1,1±0,10ab	0,09±0,02ab	12,4 ±0,58a
	AG	3,26±0,40a	0,23±0,03abc	13,7±0,43abc	1,8±0,23ab	0,15±0,02ab	12±1,5a	1,0±0,20ab	0,09±0,02ab	11 ±1,0a
PA5	BF	3,1±0,47ab	0,24±0,04abc	12,6±0,39abc	1,5±0,35abc	0,12±0,02ab	12±1,2a	0,9±0,17b	0,09±0,02ab	11 ±4,5a
	SF	3,1±0,35ab	0,25±0,02ab	12,6±0,76abc	2,1±0,31a	0,18±0,03a	12,0±0,93a	1,0±0,23ab	0,86±0,02ab	12 ±3,4a
	AG	2,6±0,23abc	0,24±0,00abc	11,0±0,96c	1,4±0,25abc	0,11±0,02ab	13±1,1a	1,06±0,06ab	0,10±0,00ab	10,7 ±0,58a
PA8	BF	1,75±0,05c	0,12±0,02d	15 ±2,1a	1,6±0,17abc	0,13±0,04ab	12 ±2,5a	1,3±0,26ab	0,09±0,02ab	14,4 ±0,52a
	SF	1,6±0,26c	0,11±0,02d	14,2 ±0,73ab	1,2±0,21bc	0,09±0,02b	13±1,8a	0,9 ±0,26b	0,08±0,02ab	11 ±3,8a
	AG	3,6±0,61a	0,28±0,04a	12,5 ±0,41abc	1,2±0,17bc	0,12±0,02ab	10±1,6a	0,73±0,06b	0,07±0,00b	10,5 ±0,82a
PA18	BF	3,6±0,53a	0,26±0,04ab	12,5 ±0,42abc	1,05±0,05c	0,08±0,02c	12±1,7a	0,80±0,20b	0,07±0,00b	11 ±2,9a
	SF	1,9±0,46c	0,16±0,03cd	12±1,1abc	1,8±0,30ab	0,13±0,04ab	13±1,4a	0,80±0,10c	0,06±0,01b	14 ±4,0a
BS20		3,3±0,38a	0,26±0,02ab	13 ±1,8abc	1,3±0,21ab	0,09±0,02c	14 ±1,3a	1,6±0,35a	0,13±0,04a	11 ±1,7a

Los valores representan las medias (n = 4) ±desviación estándar. La media entre las áreas de muestreo (AG = área de goteo; BF = bajo fronda; SF = Sin fronda) en el mismo tratamiento y profundidad seguida de la misma letra no son significativamente diferentes, según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). AST = Agrosistemas; PA5 = Palma de aceite de cinco años; PA8 = Palma de aceite de 8 años; PA18 = Palma de aceite de 18 años; PZ20 = Pastizales y BS20 = Bosques secundarios.

Almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS).

En la Tabla 4 se observan los contenidos absolutos de C (Mg C ha^{-1}) de los agrosistemas de PA5, PA8 y PA18 en las áreas AG, BF y SF, así como los tratamientos de PZ20 y BS20. De manera general los contenidos de COS en las PA5 y PA18 son significativamente más altos en la profundidad de (0-20 cm) ($p \leq 0,0001$) que los de PA8 en las áreas BF y SF, excepto en la última profundidad (donde los contenidos de COS de PA8 son similares con respecto a los PA5 y PA18). La Tabla 4 muestra que los contenidos de COS (Mg C ha^{-1}) en todos los tratamientos disminuyen significativamente conforme aumenta la profundidad; sin embargo, los AST de PA5 y PA18 en la capa de 20-40 cm del suelo del área SF tienen valores de COS estadísticamente diferentes ($p \leq 0,05$) a las áreas BF y AG del sitio PA8. En la capa de 40-60 cm del suelo el agrosistema de PA8 contiene 18 Mg C ha^{-1} en el área BF, mostrando un aumento en el COS, sin mostrar diferencia estadística con los tratamientos de PA5 y PA18. Por su parte, estos dos sitios (PA5 y PA18) contienen almacenes de COS similares en todas las áreas, presentando concentraciones de 11 Mg C ha^{-1} en promedio en las áreas SF, AG y BF (Tabla 4). Asimismo, se observa que los contenidos de COS en el tratamiento PA18 a la profundidad edáfica de 0-20 cm en el área BF ($45,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$) es significativamente ($p \leq 0,05$) superior un 20 y 46 % a los de PA5 y PA8 respectivamente, en todas las áreas consideradas, mientras que, los valores de COS en los agrosistemas de PA5, PA8 y PA18 son estadísticamente iguales ($p \leq 0,05$), observándose en el área SF contenidos entre $33,8$ a $26,29 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para esa misma profundidad (Tabla 4). En contraste, los valores medios de COS se observan en el PZ20 entre 35 a 63 Mg C ha^{-1} , mientras que BS20 es el AST que presenta los contenidos muy significativamente ($p \leq 0,0001$) superior a los agrosistemas PA y PZ en todas las capas consideradas (0-20, 20-40 y 40-60 cm) del suelo, con contenidos oscilantes entre 53 a 119 Mg C ha^{-1} (Tabla 4).

Tabla 4. Almacenamiento de carbono en suelo (Mg C ha^{-1}) en agrosistemas tropicales en Sureste de México.

AST	Área	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm
		Mg C ha^{-1}		
PZ20		63,19±11ab	32,08±5,07ab	35,18±9b
	AG	12±2,0f	6,53±1,0ef	3,51±0,6c
PA5	BF	36,39±8cd	18,0±7abc	11,0±3c
	SF	33,8±4cde	26±3ab	10,35±2,5c
	AG	11,0±0,25f	6±1,57f	4,5±0,3c
PA8	BF	24,46±0,13def	21,14±1,5bcd	18±4,5c
	SF	21,14±3,22def	16,1±3c	12±3,4c
	AG	15,0±4,30ef	5±0,45f	3,01±0,44c
PA18	BF	45,39±7bc	13,63±2def	11±2c
	SF	26,29±11cdef	23,15±3abd	11±1c
BS20		119,47±11,51a	42±7a	53,07±13a

Los valores mostrados representan la media ($n = 4$) \pm desviación estándar. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0,05$). PA5 = Palma de aceite de 5 años; PA8 = Palma de aceite de ocho años; PA18 = Palma de aceite de dieciocho años. BS20 = Bosques secundarios y PZ20 = Pastizales. AG = Área de goteo; BF = Bajo fronda; SF = Sin fronda.

En la Fig. 3 se puede observar los contenidos absolutos de COS (Mg C ha^{-1}) en los cinco AST evaluados a -60 cm de profundidad del suelo. Cuando se suman los promedios de las profundidades (0-20, 20, 40, 40-60 cm) del agrosistema de PA con diferentes edades los contenidos de COS en los sitios PA5 y PA18 parecen almacenar más COS con respecto al PA8 (del orden de 52 Mg C ha^{-1}), pero no muestran diferencia significativa ($p \leq 0,05$) entre las edades del cultivo de PA. El PZ20 tiende a duplicar los almacenes de COS con respecto a los cultivos de PA de diferentes edades, observando almacenes de COS de alrededor de 130 Mg C ha^{-1} a la profundidad de -60 cm del suelo. Por su parte, el tratamiento control (BS20) contiene significativamente ($p \leq 0,0001$) mucho más COS (214 Mg C ha^{-1}) que los AST de PA5, PA8 y PA18, así como al PZ20 referido a tal profundidad edáfica de -60 cm (Fig. 3).

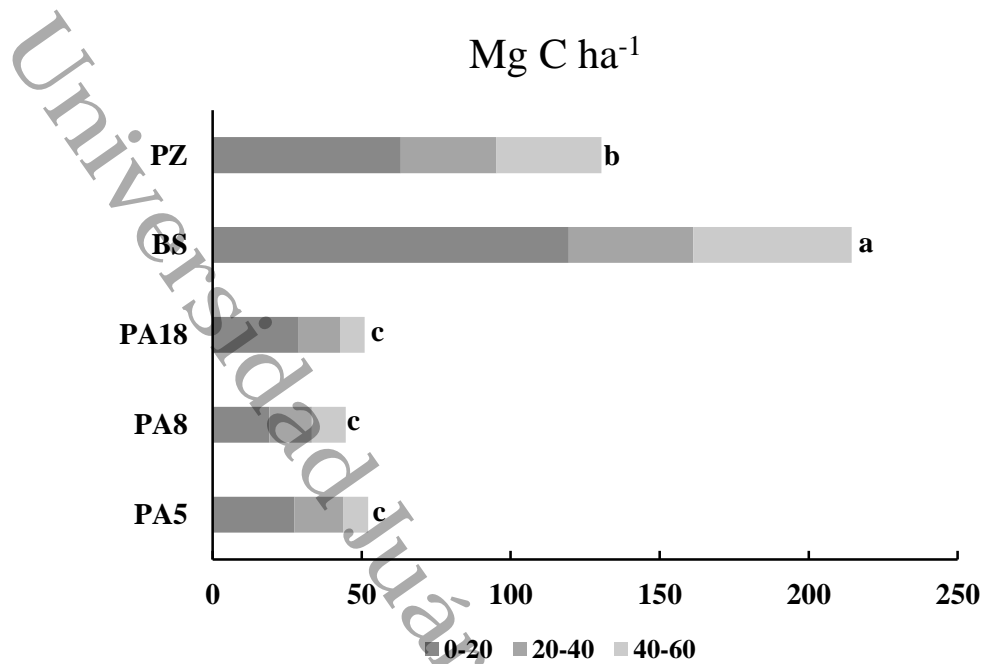


Figura 3. Almacenamiento de C en suelo de cinco agrosistemas tropicales. Contenidos de COS (Mg C ha^{-1}) referidos a -60 cm de los agrosistema palma (PA) comparados con los pastizales (PZ20) y bosques secundarios (BS20) en Tabasco (México). Los valores representan la desviación estándar ($n = 5$). Letras distintas son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). Tratamientos de PA5 = Palma de aceite de cinco años; PA8 = Palma de aceite de ocho años; PA18 = Palma de aceite de dieciocho años, BS20 = Bosques secundarios y PZ20 = Pastizales

Discusión

Propiedades físicas textura y densidad aparente del suelo asociados agrosistemas tropicales.

En los AST evaluados PA, PZ20 y BS20 la composición granulométrica no se diferenció entre las profundidades edáficas consideradas (0-20, 20-40, 40-60 cm). Se observan texturas francas en los primeros -20 cm de profundidad, mientras que en la capa de (20-60 cm) la textura es más arcillosas; estas características son relevantes para la captura del C, ya que el COS se almacena potencialmente en partículas finas (arcillosas) del suelo y varían de acuerdo con el uso y tipo de suelo (Cai *et al.*, 2016). El ligero aumento del contenido de arcilla y limo en los sitios de PA5, PA18 y BS20 tuvo efectos positivos con

respecto a los contenidos de COS y NTS, pero, negativos en los sitios de PA8 y PZ20 (Tabla 1 y 3). La disminución del contenido de COS en los AST de PA, PZ20 y BS20 es notoria a partir de los -50 cm, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Heyn *et al.* (2019), quienes señalan que el contenido del COS y el NTS son menores en suelos arenosos en comparación con suelos arcillosos, y que ambas variables disminuyen entre 50 y 90 % a una profundidad de -60 y -90 cm de la superficie del suelo.

Se observa un aumento de la D_{ap} conforme a la profundidad en los AST evaluados (Tabla 1), como ya había documentado Rahman *et al.* (2018) en plantaciones de PA de 30, 40 y 50 años de edad, así como en un BS; dicho aumento se explica por la mejor estructura que se mantiene en las primeras capas del suelo, debido a que al presentar mayores contenidos de MOS, la interacción órgano-mineral genera estructura, con una mayor porosidad al reducirse la D_{ap} (Sánchez-Hernández *et al.*, 2006).

Acidez en suelos de agrosistemas tropicales

El pH ácido de los suelos en los AST PA5, PA8 y PA18, así como del BS20 y PZ20 se corresponde con condiciones de clima tropical con abundantes lluvias, estando modelado por el paisaje geomorfológico de terrazas (Zavala-Cruz *et al.*, 2016; Brindis-Santos *et al.*, 2020), que conforman relieves de lomeríos convexos de ≤ 30 % de pendiente (Tabla 2); por tanto, ambos factores influyen en el pH edáfico en las tres profundidades consideradas de los agrosistemas evaluados, encontrándose valores oscilantes entre 4,5 y 5,5. A este respecto Bowman *et al.* (2008) mencionaron que a mayor acidificación del suelo corresponden mayores pérdidas de cationes por lixiviación, lo cual reduce la velocidad de descomposición de los residuos vegetales (Xu *et al.*, 2006a; Xu *et al.*, 2006b). Sin embargo, los valores del pH edáfico en nuestro estudio se han observado también en ambientes geomorfológicos con terreno quebrado, caracterizado por una repetición de colinas redondas o lomas alargadas en el estado de Tabasco (Zavala-Cruz *et al.*, 2014; Zavala-Cruz *et al.*, 2016). Por lo tanto, los valores del pH de la Tabla 2 no muestran un aumento significativo ($p \leq 0,05$) de la acidez edáfica con el cambio de uso del suelo (de PZ a PA), lo cual indica que el pH del suelo no se modifica por el uso de los AST de PA, PZ20 y BS20. Sin embargo, pueden ocurrir cambios en la acidez edáfica como consecuencia de la

aplicación de fertilizantes amónicos en los citados sistemas agrícolas (Berkelman *et al.*, 2018).

Carbono y Nitrógeno en suelo de agrosistemas, en Tabasco (México).

Los contenidos significativamente más altos de COS y NTS encontrados en las áreas AG en PA5 y PA18 coinciden con los reportados en Colombia por Reyes *et al.* (1997) y en Malasia por Haron *et al.* (2008). En el cultivo de *E. guineensis* Jacq. la mayor cantidad de biomasa radical se localiza a 60 cm de distancia del estípite de la planta, lo que explica los mayores porcentajes de COS y NTS registrados en el área AG con respecto al área SF. Los estudios realizados en Brasil por Frazão *et al.* (2013) y Frazão *et al.* (2014) indican que en plantaciones de PA de 4, 8 y 25 años, y en plantaciones de 23 y 34 años, los contenidos de COS y NTS se ubican en las áreas antes mencionadas, disminuyendo al aumentar la distancia a partir de la base de la planta y la profundidad del suelo, respectivamente, como resultado de la mayor acumulación de biomasa radicular de las palmeras.

De acuerdo con Haron *et al.* (1998) la biomasa microbiana (BMM) aumenta conforme la edad de la plantación, lo que se refleja en incrementos en el contenido de COS; sin embargo, mencionaron que, a pesar que el agrosistema PA en las áreas BF (hojas) reciben insumos de hojarasca mucho más altos que las áreas SF y AG, la mayor parte del material residual de hojas se descompone en la superficie del suelo y no afecta significativamente la biomasa microbiana del suelo, aumentando los contenidos de COS en el área AG a partir de la descomposición de las raíces (Tabla 3). El área SF de los agrosistemas PA5, PA8 y PA18 contiene también los más bajos valores de COS y NTS observados. Al respecto, Ng *et al.* (2012) argumentaron que esta área se mantiene relativamente libre de hojarasca y, por tanto, no agregaría residuos orgánicos, excepto por la baja densidad de arvenses que se mantienen por las prácticas culturales. Aunado a lo anterior, la disminución del COS en el área SF se ve afectada por un drenaje deficiente entre hileras y la compactación del suelo debido al tráfico de maquinaria (Heyn *et al.*, 2019). Yahya *et al.* (2010) mencionaron que la PA tiene un sistema de raíces adventicias que se ven afectadas por el paso de maquinaria, lo que aumenta la D_{ap} y reduce la macroporosidad, afectando el crecimiento de la raíz, por lo que el contenido de COS y NTS

en el área SF se reduce, comportamiento que se observan en plantaciones de PA5, PA8 y PA18 en la primera capa de suelo; por tanto, el mayor almacenamiento de COS y NTS se registra en las áreas AG y BF, donde no transita maquinaria agrícola (Tabla 3). Según Corley y Tinker (2016), además, en el cultivo de palma de aceite más del 80 % de volumen de raíces absorbentes se encuentran en la superficie del suelo, por lo que el laboreo pesado afecta la rizosfera (Yahya *et al.*, 2010).

Los resultados de la presente investigación sugieren que tras el cambio de uso de suelo de pastizal (PZ20) a PA, existe un significativo aumento en el contenido de COS en todas las áreas y edades del cultivo de palma, excepto en el área SF del sitio PA18, que muestra una disminución en las variables de COS y NTS (Tabla 3). Estos resultados concuerdan con los reportados por Goodrick *et al.* (2015) en evaluaciones a plantaciones de 1 a 25 años de edad en Popondetta (provincia de Oro, Papúa Nueva Guinea) con cambios de uso de suelo similares a los evaluados en la presente investigación; aunque Frazão *et al.*, (2013) indicaron que después de un cambio de uso de suelo de PZ a PA el COS es menor en un 35-46 % en comparación con los contenidos que mantenían antes de la sustitución del pastizal.

Relación C/N en agrosistemas tropicales

Los resultados de la relación C/N (Tabla 3) en los AST estudiados son estadísticamente diferentes ($p \leq 0,05$) en la primera profundidad (0-20 cm) mientras que, en la capa de suelo de (20-60 cm) en general los valores que se observan son estadísticamente similares ($p \leq 0,05$). De acuerdo con la relación C/N en la capa edáfica superficial (0-20 cm) se observa un incremento en las relaciones C/N con respecto a las capas más profundas de las áreas AG, BF y SF de los AST PA5, PA8 y PA18, similarmente a lo encontrado en los BS20 y PZ20 (Tabla 3); en las capas subyacentes la relación C/N desciende a 12 en los agrosistemas PA5, PA8 y PA18, resultados que son similares a los reportados por Frazão *et al.* (2013) en estudios realizados en plantaciones de PA de 4, 8 y 25 años a una profundidad 0-30 cm. Haron *et al.* (1998) señalaron que la relación C/N aumentan conforme a la edad del cultivo, contrastando con los resultados obtenidos en la presente investigación (Tabla

3), donde la relación C/N se mantiene a lo largo de la cronosecuencia. De acuerdo con Domínguez *et al.* (2019) las relaciones C/N registradas en esta investigación son propias de suelos agrícolas, pastizales o de uso forestal, caracterizados por su poca fertilidad y con altas tasas de mineralización, lo que provoca la proliferación de microorganismos descomponedores de los residuos orgánicos, ya que cuenta con suficiente C para utilizarlo como fuente de energía y N para sintetizar sus proteínas (Gamara *et al.*, 2010). En los monocultivos que reciben constantemente N inorgánico en el suelo la relación C/N se reduce (Novelli *et al.*, 2009). En cambio, el uso de suelo forestal a sistemas agroforestales la relación C/N se reduce hasta un valor de 13-16, similares a los reportados en el presente estudio (Hernández *et al.*, 2017). En plantaciones de PA con edades entre 24 y 34 años el COS y la relación C/N se estabilizan al aumentar la edad de las plantaciones (Frãzao *et al.*, 2014), en parte porque que al aumentar la edad de la PA el humus presente en el suelo se vuelve más resistente a la mineralización; a este respecto Petit-Aldana *et al.* (2019) mencionaron que la relación C/N es un indicativo para conocer la calidad y equilibrio que existe en el COS; por lo que una relación C/N con valores >25 provocan inmovilización neta del N por los microorganismos, ocasionando déficit de N a las plantas; mientras que valores entre 10 y 15, promueven una mineralización neta y una rápida ruptura de tejidos; con base en ello los rangos observados en PA5, PA8 y PA18 años, PZ20 y BS20 indican que la actividad microbiana del suelo provoca la disponibilidad de nutrientes tanto para los microorganismos, como para las plantas de los agrosistemas evaluados (Wiesmeier *et al.*, 2014; Gamara *et al.*, 2017; Peña-Peña e Irmmler, 2018; Wang *et al.*, 2018).

Almacenamiento de carbono orgánico en suelos de plantaciones de palma de aceite con diferentes edades.

El almacenamiento de C en los suelos de los agrosistemas PA5, PA8 y PA18 en las áreas AG, BF y SF osciló entre 11 y 45 Mg C ha⁻¹, teniendo significativamente mayor potencial en la zona BF en PA18 y capacidad de almacenar hasta 46 Mg C ha⁻¹ en los primeros -20 cm de profundidad del suelo (Tabla 3 y Fig. 2). Frazão *et al.* (2013) mencionaron que el potencial de fijación de C en PA en el área BF oscilaba entre 25.4 y 29.6 Mg C ha⁻¹ en áreas BF y entre filas respectivamente en plantaciones de PA de 4, 8 y

25 años, contenidos de COS que están por debajo de los 33.8 y 45.3 Mg C ha⁻¹ en las áreas y edades similares de esta investigación. Según Frazão *et al.* (2014) en Brasil el área de fronda y sin fronda en las plantaciones de PA ocupan el 20 y 80%, respectivamente; con esos datos el cálculo del COS en la PA se estima que en los primeros -30 cm de profundidad las reservas de C se valoran en 38.5 y 66.6 Mg C ha⁻¹ en PA de 23 y 34 años respectivamente; cantidades inferiores a las que se registran a los -20 cm de profundidad en la PA18 de esta investigación (Tabla 3). Según Bakar *et al.* (2010) la adición de residuos orgánicos en las plantaciones de PA incrementan las cantidades de COS y NTS en superficie debido al aumento de la MOS a través del tiempo (Haron *et al.*, 1998; Frazão *et al.* 2014).

Potencial de captura de C en palma de aceite con diferentes edades en el trópico mexicano.

Las diferentes zonas de muestreo (AG, BF y SF) en las plantaciones de PA muestran diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el almacenamiento de COS cuando se hace la conversión de los porcentajes de C a Mg C ha⁻¹; debido a las diferencias en la distribución de la fuente de C. El 44.4% del COS se localiza en el área BF, seguido del 42.1% y el 13.33% que se localiza en la zona SF y AG respectivamente (Fig. 2). Por lo tanto, independientemente de las edades de la PA y del PZ, el almacenamiento de COS es de alrededor de 52 Mg C ha⁻¹ en los primeros -60 cm de la superficie. Los sistemas PZ20 y el BS20 registraron 60 y 76 % más COS con respecto al promedio de captura de COS en PA, por lo que el potencial de captura de COS en ambos AST se estima entre 130 a 214 Mg C ha⁻¹ (Fig. 3). Los resultados observados en el AST de PA son difíciles de comparar por las diferencias en cuanto al manejo agronómico, grupos de suelos y profundidades de muestreo con respecto a otros estudios; sin embargo, al realizar algunas homologaciones, se establece que el potencial de almacenamiento de COS en PA de Costa Rica es de 96,0 y 103 Mg C ha⁻¹ a una profundidad de -30 cm y -50 cm respectivamente (Leblanc *et al.* 2008), cantidades sensiblemente superiores a las reportadas en la presente investigación a una profundidad de -60 cm. Algunos estudios realizados por Khasanah *et al.* (2015) en Indonesia estimaron el COS a -30 cm de profundidad en PA en 51,86 Mg C ha⁻¹, aunque señalaron que los contenidos de COS se pueden incrementar a través del tiempo mediante

buenas prácticas, que incluye la retención de residuos orgánicos dentro de la plantación, cultivos de cobertura e, incluso, reintegrar los residuos orgánicos de la cosecha a la plantación.

Los contenidos de COS en la PA18 que se reportan en la presente investigación se mantienen por debajo a los estimados a los autores anteriores; esto se explica, en parte, por una fertilización deficitaria de las plantaciones. Al respecto, Frazão *et al.* (2014) señalaron que la edad de la PA influye en la concentración del COS; estos autores reportaron que el contenido de COS a una profundidad de 0-30 cm fue de 34,3 Mg C ha⁻¹ (tras 23 años de cultivo) y 66.6 Mg C ha⁻¹ (tras 34 años); la segunda cantidad es netamente superior a los 43 Mg C ha⁻¹ que se registran a los -40 cm del perfil en PA5, PA8 y PA18 de esta investigación. Frazão *et al.* (2013) reportaron que después de un cambio de uso de suelo de PZ a PA se registra una cantidad de 33,2 Mg C ha⁻¹ a los 4 años después de dicho cambio; a los 8 años es de 26,6 Mg C ha⁻¹ y a los 25 años es de 22,7 Mg C ha⁻¹; esas cantidades son similares a los valores reportados en este estudio, excepto en PA8 y PA18; sin embargo, si se consideran el contenido de COS de los primeros -30 cm los valores de esta investigación es mayor a los indicados por los autores antes mencionados.

Conclusiones

El incremento del contenido de arcilla con la profundidad, aunado a la disminución del COS, afecta el valor de la densidad aparente, aumentando conforme a la profundidad del suelo.

En los sistemas PA5, PA18 y el BS20 un aumento del contenido de arcilla afecta positivamente el contenido de COS y NTS en la capa edáfica superficial (0-20 cm); en las capas 20-40 y 40-60 cm no se observa este efecto.

El pH del suelo no se modifica después de la conversión de PZ a PA; sin embargo, se

observa un incremento significativo del pH en el pastizal (PZ) a mayor profundidad.

Las plantaciones de PA de 5, 8 y 18 años muestran mayor acumulación de COS con respecto a lo acumulado en plantaciones de 8 años; las entradas de hojas podadas y la acumulación de residuos orgánicos secos y provenientes de raíces parecen incrementar el contenido de COS y NTS en comparación al área sin fronda (SF) en este agrosistema a diferentes edades. El valor de la relación C/N indica que el ritmo de mineralización es bueno en todos los agrosistemas muestreados.

Las plantaciones de PA de 5, 8 y 18 años mostraron un reducido potencial de captura de COS en comparación con el bosque secundario (BS20), pero se evidencia que el contenido de COS puede aumentar con el tiempo mediante un apropiado manejo a niveles iguales o superiores al pastizal (PAZ20) en la zona Sierra de Tabasco (México).

Literatura citada

Ajiboye, A.G., Aduloju, M.O., Jaiyeola, O.A., 2015. Organic carbon fractions and micronutrient status of soils under some plantation crops in southwestern Nigeria. Archives of Agronomy & Soil Science, 61, 1089-1105. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.990005>.

Bakar, R.A., Darus, S.Z., Kulaseharan, S., Jamaluddin, N., 2011. Effects of ten year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 89, 341-349. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9398-9>.

Batjes, N, 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 47, 151-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>.

Berkelmann, D., Schneider, D., Engelhaupt, M., Heinemann, M., Christel, S., Wijayanti, M., Meryandini, A., Daniel, R., 2018. How rainforest conversion to agricultural systems in Sumatra (Indonesia) affects active soil bacterial communities. Frontiers in microbiology, 9, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02381>.

Bowman, W., Cleveland, C., Halada, L., Hreško, J., Baron, J.S., 2008. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. *Nature Geoscience*, 1, 767-770. <http://doi:10.1038/ngeo339>.

Brindis-Santos, A.I., Palma-López, D.J., Zavala-Cruz, J., Mata-Zayas, E.E., López-Bustamante, Y.I., 2020. Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en Planicies y Terrazas de Tabasco, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72,1-17. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a090919>.

Blake, G.R. Hartge, K.H., 1986. Bulk density. In: A. Klute (Eds.), *Methods of soil analysis, Part I. Physical and mineralogical methods*, 2nded. American Society of Agronomy and SSSA. Agronomy Monograph. Madison, Wisconsin, USA, n° 9, pp 363-375. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>.

Cai, A., Feng, W., Zhang, W., Xu, M., 2016. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. *Journal of Environmental Management*, 172, 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.009>.

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.

Cerri, C.C., Bernoux, M., Cerri, C.E.P., Lal, R., 2006. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: Lal R, Cerri CC, Bernoux M, Etchevers J, Cerri CEP, (Eds.). *Carbon sequestration in soil of Latin America*. New York: Haworth. pp. 41-47.

Corley, R.H.V., Tinker, P.B., 2016. *The oil palm*. 5th Edition. Wiley Blackwell. pp 639.

Crespo-Mendes, N., Laurent, A., Bruun, H.H., Hauschild, M.Z., 2019. Relationships between plant species richness and soil pH at the level of biome and ecoregion in Brazil. *Ecological Indicators*, 98, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.004>.

Day, P., 1965. Particle fractionation and particle size analysis. Part 1. In Black, C.A. (Eds.). Method of soil analysis. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA. p 565-566. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c43>

de Carvalho, W.R., Vasconcelos, S.S., Kato, O.R., Capela, C.J.B., Castellani, D.C., 2014. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. *Agroforest Syst*, 88, 357–368. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9689-2>.

Domínguez Bautista, R.J., Tobías Baeza, A., Acosta, R., del Carmen, S., Salvador Morales, P., Galindo Alcántara, A., Sánchez-Hernández, R., 2019. Almacenamiento de carbono y agua en un área periurbana de Tabasco. *Terra Latinoamericana*, 37, 197-208.

Etchevers, J.D., Monreal, C.M., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., López, R.M., 2005. Manual para la Determinación de Carbono en la Parte Aérea y Subterránea de Sistemas de Producción en Laderas. Colegio de Postgraduados, México, 1^{ra} edn. pp 29.

Fraão, L.A., Paustian, K., Pellegrino, C.C.E., Cerri, C.C., 2013. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *GCB Bioenergy*, 5, 384–390. <https://doi:10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x>.

Fraão, L.A., Paustian, K., Pellegrino, C.C.E., Cerri, C.C., 2014. Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. *Biomass & Bioenergy*, 62, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.031>.

Gamarra, C., Lezcano, M.I.D., de Ortíz, M.V., del Pilar Galeano, M., Cardús, A. J.N.C., 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 4-26. <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>

Goodrick, I, Nelson, P.N., Banabas, M., Wurster, C.M., Bird, M.I, 2015. Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. *GCB Bioenergy*. 7, 263–272. <https://doi:10.1111/gcbb.12138>.

Guillaume, T., Kotowska, M.M., Hertel, D., Knohl, A., Krashevskaya, V., Murtillaksono, K., Scheu, S., Kuzyakov, Y., 2018. Carbon costs and benefits of Indonesian rainforest conversion to plantations. *Nature Communications*, 9, 1-11. <https://doi:10.1038/s41467-018-04755-y>.

Haron, K., Brookes, P.C., Anderson, J.M., Zakaria, Z.Z, 1998. Microbial biomass and soil organic matter dynamics in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations, West Malaysia. *Soil Biology & Biochemistry*, 30, 547-552. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00217-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00217-4).

Hernández Ordoñez, J. O., Gutiérrez Castorena, M., Ortiz Solorio, C. A., Sánchez Guzmán, P., Ángeles Cervantes, E., 2017. Calidad de Andosols en sistemas forestal, agroforestal y agrícola con diferentes manejos en Zacatlán, Puebla. *Terra Latinoamericana*, 35, 179-189.

Henson, I.E., 2004. ¿Puede la palma de aceite sustituir el bosque húmedo tropical? *Revista Palmas*, 25, 95-105.

Heyn, N., Joergensen, R.G., Wachendorf, C., 2019. Soil organic C and N stocks in the first rotation of poplar plantations in Germany. *Geoderma Regional*, 15,1-10. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00211>.

Khasanah, N.M., van Noordwijk, M., Ningsih, H., Rahayu, S., 2015. Carbon neutral? No change in mineral soil carbon stock under oil palm plantations derived from forest or non-forest in Indonesia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 211, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.009>.

Kotowska, M.M., Leuschner, C., Triadiati, T., Meriem, S., Hertel, D., 2015. Quantifying above- and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of Sumatra (Indonesia). *Global Change Biology*, 21, 3620-3634. <https://doi.org/10.1111/gcb.12979>.

Kimura, S.D., Melling, L., Goh, K.J, 2012. Influence of soil aggregate size on greenhouse gas emission and uptake rate from tropical peat soil in forest and different oil palm development years. *Geoderma*, 185, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.026>.

Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304,1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.

Lamade, E.E., Setiyo, I.E., Girard, S., Ghashghaie, J., 2009. Changes in $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ of oil palm leaves to understand carbon use during their passage from heterotrophy to autotrophy. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23, 2586-2596. <https://doi.org/10.1002/rcm.4169>.

Laurance, W.S., Sayer, J., Cassman, K.G., 2014. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology & Evolution*, 29, 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>.

Leblanc, H.A., Russo, R.O., 2008. Carbon Sequestration in an Oil Palm Crop System (*Elaeis guineensis*) in the Caribbean Lowlands of Costa Rica. *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, 121, 52-54.

Novelli, L., Melchiori, R., Caviglia, O., 2009. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de C y N en diferentes tamaños de agregados. *Revista Científica Agropecuaria*, 13, 25-32.

Ng, P.H.C., Gan, H.H.; Goh, K.J., 2012. Soil nutrient changes in Ultisols under oil palm in Johor, Malaysia. *Journal of Oil Palm, Environment & Health (JOPEH)*, 2, 93-104. <https://doi:10.5366/jope.2011.10>.

Olson, K.R., Al-Kaisi, M.M., Lal, R., Lowery, B., 2014. Experimental consideration, treatments and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of American*, 78, 348–360. <https://doi:10.2136/sssaj2013.09.0412>.

Palma-López, D.J., Cisneros, D.J., Moreno, C.E., Rincón-Ramírez, J.A., 2007. Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable: Villahermosa, Colegio Postgraduados ISPROTAB-FUPROTAB, 184 p.

Pauli, N., Donough, C., Oberthür, T., Cock, J., Verdooren, R., Rahmadsyah, Abdurrohim, G., Indrasura, K., Lubis, A., Dolong, T., Pasuquin, J.M., 2014. Changes in soil quality indicators under oil palm plantations following application of 'best management practices' in a four-year field trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 195, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.005>.

Palacio, Á.A.R., Hurtado, F.H.M., 2008. Respiración microbial y de raíces en suelos de bosques tropicales primarios y secundarios (Porce, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61, 4381-4393.

Petit-Aldana, J., Rahman, M.M., Parraguirre-Lezama, C., Infante-Cruz, A., Romero-Arenas, O., 2019. Litter Decomposition Process in Coffee Agroforestry Systems. *Journal of Forest & Environmental Science*, 35, 121-139. <https://doi.org/10.7747/JFES.2019.35.2.121>.

Peña-Peña, K., Irmeler, U., 2018. Nitrogen and carbon losses from decomposing litter in natural and agroecosystems of two different climate regions of Brazil. *European Journal of Soil Biology*, 86,26-33. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.02.003>.

Programa Mexicano del Carbono, A.C., 2015. Manual de Procedimientos Inventario de Carbono+. *Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX)*. Coord.: F. Paz Pellat. Texcoco, Estado de México. pp 57.

Rantoo, N.R., van Huyssteen, C.W., du Preez, C.C., 2014. Organic Carbon Content in the Soil Master Horizons of South Africa. *Soil Science Society of America*, 14, 2-12. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.10.0143>

Rahman, N., de Neergaard, A., Magid, J., van de Ven, G.W., Giller, K.E., Bruun, T.B., 2018. Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysian Borneo. *Environmental Research Letters*, 13,10 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade0f>.

Reyes, C., Bastidas, P., Peña, R., Eduardo, A., 1997. Distribución del sistema radical de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia Root system distribution of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Tumaco, Colombia. 18, 49-55.

Robert, M., 2002. Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. ISBN: 92-5-304690-2. pp 68.

Rullán-Silva, C.D., Gama-Campillo, L.M., Galindo-Alcántara, A., Olthoff, A.E., 2011. Clasificación no supervisada de la cobertura de suelo de la región Sierra de Tabasco mediante imágenes LANDSAT ETM+. *Universidad y Ciencia*, 27, 33-41.

Rugnitz, M.T., Chacón, M.L., Porro, R., 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/Consortio Iniciativa Amazónica (IA). Lima, Perú.

Salazar-Conde, E.C., Zavala-Cruz, J., Castillo-Acosta, O., Cámara-Artigas R., 2004. Evaluación espacial y temporal de la sierra madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM*, 54, 7-23.

Sánchez, A.J., Barba, E 2005. Vegetación terrestre. Cap. 1: 1-16. Biodiversidad del Estado de Tabasco. UNAM-Conabio, México. pp 370.

Sánchez-Hernández, R., Ordaz-Chaparro, V.M., Benedicto-Valdés, G.S., Hidalgo-Moreno, C.I., Palma-López, D.J., 2006. Regeneración estructural de un suelo arcilloso por aportes de vermicompost en la Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 22, 13-26.

Sánchez, S., Crespo, G., Hernández, M., García, Y., 2008. Factores bióticos y abióticos que influyen en la descomposición de la hojarasca en pastizales. *Pastos y Forrajes*, 31,99-118.

Schlegel, B., Gayoso, J., y Guerra, J. (2001). Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia (Chile). pp 1-14.

Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S, de Moraes Sa J.C., *et al.*, 2002 Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: Effects of no-tillage. *Agronomie, EDP Sciences*, 22, 755-775.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2019. Consultado el 15/01/2020. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.

Smith, D.R., Townsend, T.J., Choy, A.W., Hardy, I.C., Sjögersten, S, 2012. Short-term soil carbon sink potential of oil palm plantations. *GCB Bioenergy*, 4, 588-596. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01168.x>

Tudela, F., 1990. Recursos naturales y sociedad en el trópico húmedo tabasqueño. *Medio ambiente y desarrollo en México*, 1, 149-189.

Van Noordwijk, M., Ningsih, H., Rahayu, S., 2015. Carbon neutral? No change in mineral soil carbon stock under oil palm plantations derived from forest or non-forest in Indonesia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 211,195-206. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.009>.

Vásquez-Polo, J.R., Vázquez, F.M., Menjivar-Flores, J.C, 2011. Formas de carbono orgánico en suelos con diferentes usos en el departamento del Magdalena (Colombia). *Acta Agronómica*, 60, 369-379.

Wang, S., Adhikari, K., Wang, Q., Jin, X., Li, H., 2018. Role of environmental variables in the spatial distribution of soil carbon ©, nitrogen (N), and C: N ratio from the

northeastern coastal agroecosystems in China. *Ecological Indicators*, 84, 263-272.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.046>.

Wiesmeier, M., Barthold, F., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Kögel-Knabner, I., 2014. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany). *Geoderma Regional*, 1, 67-78.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.001>.

Xu, J.M., Tang, C., Chen, Z.L., 2006. The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 709-719.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.022>.

Xu, J.M., Tang, C., Chen, Z.L., 2006. Chemical composition controls residue decomposition in soils differing in initial pH. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 544-552.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.006>.

Yahya, Z., Husin, A., Talib, J., Othman, J., Ahmed, O.H., Jalloh, M.B., 2010. Oil palm (*Elaeis guineensis*) roots response to mechanization in Bernam series soil. *Am J Appl Sci*, 7, 343e8.

Zuraidah, Y., Aminuddin, H., Jamal, T., Jamarei, O., Osumanu, H. A., Mohamadu, B.J. 2010. Oil palm (*Elaeis guineensis*) roots response to mechanization in Bernam series soil. *American Journal of Applied Sciences*, 7, 343-348.

Zavala-Cruz, J., Salgado-García, S., Marín-Aguilar, Á., Palma-López, D. J., Castelán-Estrada, M., Ramos-Reyes, R., 2014. Transecto de suelos en terrazas con plantaciones de cítricos en Tabasco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1, 123-137.

Zavala, C.J. Castillo, A.O., 2002. Cambios de uso de la tierra en el estado de Tabasco. *Plan de uso sustentable de los suelos del Estado de Tabasco*, 2, 38-56.

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, 161-171.

CAPITULO 5

ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE AGROSISTEMAS TROPICALES EN TABASCO, MÉXICO

Carbon storage in aboveground biomass of tropical agrosystems in Tabasco, Mexico

Brindis-Santos, Alfredo Isaac^{1,2}; Sánchez-Hernández, Rufo³; Mata-Zayas, Ena Edith^{2*}, Palma-López, David
Jesús⁴, Sánchez-Gutiérrez, Facundo¹, Camara-Cabrales, Luisa del Carmen²

^{1,2} Facultad Maya de Estudios Agropecuarios, Universidad Autónoma de Chiapas, Carretera Catazajá-
Palenque Km 4. Catazajá, Chiapas. C.P. 29980,

² División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera
Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, Entronque a Bosques de Saloya, Villahermosa, Tabasco. C.P. 86150.

³ División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera
Villahermosa-Teapa Km. 25 R/A La Huasteca, Segunda Sección. Villahermosa, Tabasco, C.P. 86280.

⁴ Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N. Cárdenas, Tabasco, C.P.
86500.

Autor de correspondencia: ena.mata@ujat.mx

Resumen

El secuestro del dióxido de carbono (CO₂) en la biomasa de los agrosistemas es una alternativa para la mitigación del cambio climático global y la regulación del clima. Las 102 mil hectáreas de palma de aceite (*Elaeis guineensis* J.) establecidas en el sureste mexicano tienen potencial para la captura de carbono (C). Por ello, se desarrolló una investigación para estimar el almacenamiento de C en la biomasa aérea de agrosistemas de palma de aceite de diferentes edades, pastizales y bosques secundarios en la zona sierra de Tabasco, México. En los agrosistemas de palma de aceite (PA) y bosque secundario (VS) se calculó la biomasa aérea total (BAT) mediante ecuaciones alométricas y se realizó una interpolación para estimar la cantidad de C almacenado, en el pastizal la interpolación para

estimar los contenidos de C se realizó a partir de la producción de materia seca. La mayor BAT de los agrosistema de palma de aceite se observaron en plantaciones de PA de 18 años con 106 Mg ha^{-1} , seguido de las PA de 8 y 5 años, con 61 y 48 Mg ha^{-1} , por lo que la captura de C se estima en 60.05 , 28.54 y $19.19 \text{ Mg C ha}^{-1}$ respectivamente. El pastizal registró la menor cantidad de BAT y C total, mientras que el BS registró los mayores valores de esas variables. Se concluye que la BAT de los agrosistemas de PA funcionan como mayores almacenes de C con respecto al pastizal, sin llegar a superar al BS.

Palabras clave: Ecuaciones alométricas, biomasa aérea, palma de aceite, agrosistemas tropicales.

Abstract

The sequestration of carbon dioxide (CO_2) in the biomass of agrosystems is an alternative for global climate change mitigation and climate regulation. The 102 thousand hectares of palm oil (*Elaeis guineensis* J.) established in the Mexican southeast have potential for carbon sequestration (C). Therefore, an investigation was carried out to estimate the storage of C in the aerial biomass of oil palm agrosystems of different ages, grasslands and secondary forests in the Sierra de Tabasco area, Mexico. In the oil palm (PA) and secondary forests (BS) agrosystems, the total aerial biomass (BAT) was calculated using allometric equations and an interpolation was performed to estimate the amount of C stored, in the pasture the interpolation to estimate the contents of C was made from the production of dry matter. The highest BAT of oil palm agrosystems were observed in 18-year-old PA plantations with 106 Mg ha^{-1} , followed by 8 and 5-year PAs, with 61 and 48 Mg ha^{-1} , so capture of C is estimated at 60.05 , 28.54 and $19.19 \text{ Mg C ha}^{-1}$ respectively. The grassland recorded the lowest amount of BAT and total C, while the BS recorded the highest values of these variables. It is concluded that the BAT of the agrosystems of PA function as major stores of C with respect to the grassland, without exceeding the BS.

Keywords: Allometric equations, aerial biomass, oil palm, tropical agrosystems.

INTRODUCCIÓN

La biomasa aérea en sistemas forestales, sistemas agroforestales y sistemas agrícolas es necesaria para usos comerciales (biocombustibles, madera, fibra, etc) y para evaluar los cambios de uso del suelo con respecto a los flujos del ciclo del carbono (C) (Henry *et al.*, 2010; Aholoukpe *et al.*, 2018; Fernandes *et al.*, 2018). La evaluación del almacenamiento de C en sistemas agrícolas y cultivos perennes ha tomado cada vez mayor importancia ante la preocupación por reducir los efectos del Cambio Climático (Casanova-Lugo *et al.*, 2011; Gómez-Díaz *et al.*, 2012; Chávez-Aguilar *et al.*, 2016; Salvador-Morales *et al.*, 2019). La producción de biomasa aérea es una alternativa para la regulación del clima a través del secuestro del dióxido de carbono (CO₂); la biomasa refleja las condiciones sanitarias y ambientales en un agrosistema (Sinha *et al.*, 2015). La absorción de CO₂ mediante la fotosíntesis es un proceso biótico de las plantas y al mismo tiempo funcionan como almacén de carbono a través de la parte leñosa, hojas y raíces, que posteriormente se convierten parcialmente en materia orgánica (Avendaño *et al.*, 2009).

En el estado de Tabasco, México, la presión ejercida por las actividades antrópicas entre 1965 y 1996, trajo como consecuencia la pérdida de biodiversidad en los ecosistemas tropicales, así como la disminución de la superficie boscosa (Cruz-Angón *et al.*, 2019; Vargas-Simón *et al.*, 2019). Esta situación ha favorecido el crecimiento de pastizales y cultivos perennes en la región. Entre estos cultivos, la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) ha tenido un incremento del 30 % de superficie en los últimos 11 años en el sureste mexicano. El cultivo de esta oleaginosa tropical pasó de ocupar 30,034.77 ha de superficie establecida en el 2007 a 101,753.22 ha en el 2018 (SIAP, 2019). Sin embargo, esta expansión ha provocado controversias en relación a los impactos sociales y ambientales que trae consigo su cultivo (Ávila y Ávila, 2015; Isaac-Maques *et al.*, 2016). En este sentido Chase *et al.* (2010) y Rivera-Méndez *et al.* (2017) argumentan que el óxido nitroso (N₂O) es el gas de efecto invernadero que más se libera durante la etapa del ciclo de vida del cultivo (30 años) de *E. guineensis* Jacq., por el exceso de la aplicación de N en la

fertilización. En contraste, Lamade y Bouillet, (2005) y Pulhin *et al.* (2014) mencionan que una plantación de *E. guineensis* Jacq. funciona como sumidero de C contribuyendo a contrarrestar el efecto provocado por este gas de efecto invernadero. En este mismo sentido Kotowska *et al.* (2015) en Sumatra argumentan que a partir de la biomasa de *E. guineensis* Jacq. (estípites, hojas y raíces) se puede almacenar hasta 78 Mg C ha⁻¹. Por su parte Pulhin *et al.* (2014) en Filipinas reportaron un potencial del cultivo de 55 Mg C ha⁻¹ capturado en la biomasa aérea. En el sureste mexicano se desarrolló una investigación para medir la biomasa y el C capturado en plantas de 12 años del cultivo de *E. guineensis* Jacq. (Ramos-Escalante *et al.*, 2018). Sin embargo, el estudio se realizó con medición directa y con una edad específica del cultivo; implicando procedimientos de muestreo tediosos y costosos, consumiendo tiempo y sensible a la variación entre las plantas individuales, debido al número limitado de palmas que por lo general se derriban (Kho y Jepsen, 2015). En contraste, emplear ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea es una alternativa más fácil de usar que los métodos destructivos, ya que son desarrolladas para evaluar la tasa de crecimiento, la biomasa y producción de materia seca de las palmas, además, facilita el seguimiento a largo plazo, y contribuye a mitigar el CO₂ que se liberaría a la atmosfera al derribar las plantas (Aholoukpe *et al.*, 2013; Aholoukpe *et al.*, 2018). En este contexto, es importante estimar la cantidad de biomasa aérea de *E. guineensis* Jacq., y el potencial de C capturado a través del tiempo debido a que es de interés agrícola y ambiental. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue estimar la biomasa aérea total y la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea (tallos y hojas) en agrosistemas de (palma de aceite en diferentes edades y compararlo con pastizales, tendiendo como control el bosque secundario en la zona sierra de Tabasco, México debido a la falta de selvas naturales en el área de desarrollo de las plantaciones de palma.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El presente trabajo se realizó en los municipios de Jalapa y Tacotalpa, ubicados en la región de la Sierra en el estado de Tabasco. El área de estudio se ubica en la provincia fisográfica Llanura Costera del Golfo del Sur y esta conformada por planicies y terrazas. Tiene una extensión de 7,080 ha, entre las coordenadas 17° 31' 57", 17° 47' 44" N y 92° 42' 55" , 92° 54' 22 O. Limita al norte con los municipios de Macuspana y Centro, al

sur y al este con el estado de Chiapas y al oeste con los municipios de Teapa y Centro (INEGI, 2017). La geomorfología del área se forma por relieve/modelados de Terrazas y Lomeríos, dominados por procesos de erosión e intemperización, asociados a rocas sedimentarias detrítica y brecha andesítica de edad entre Terciario (Paleooceno) y Cuaternario (Pleistoceno), con alturas de 7,0 a 70 msnm y pendientes $\leq 30\%$ (SGM, 2008; Zavala-Cruz *et al.*, 2016). La hidrología está conformada por las cuencas de los ríos Grijalva, Pichucalcó, Teapa, Puyacatengo, Puxcatán, Chinal, La Sierra y Tacotalpa (INEGI, 2017). El clima se caracteriza por ser cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am(f) en Jalapa y cálido húmedo con lluvias todo el año Af(m) en Tacotalpa, con precipitación media de 2 500 a 4 500 mm por año, y temperatura media de 26°C (Palma-López *et al.*, 2007; INEGI, 2017). Se seleccionaron agrosistemas de palma de aceite (PA) de diferentes edades, bosque secundario o acahuals (BS) y pastizales (PZ).

Selección de sitios de muestreo. Para seleccionar los sitios de muestreos, se consideró el estudio geopedológico a escala 1:50 000 elaborado por Brindis-Santos *et al.* (2020) del área de estudio. Los suelos predominantes desarrollan tres horizontes genéticos A/B/C de grupos Luvisoles (LV) y Lixisoles (LX), dominado anteriormente por pastizal de *Brachiaria humidicola* (Rendle Schweick) según información proporcionada por los productores. Sin embargo, con apoyo federal, en el año de 1997 buena parte de estos paisajes fueron sustituidos por el cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.). Las unidades de muestreo (UM) seleccionadas fueron: *E. guineensis* Jacq., de 5 años (PA5), de 8 años (PA8) y de 18 años (PA18), pastizales de más de 20 años (PZ) y como tratamiento control bosque secundario de 20 años (BS). El BS se considera lo más cercano a la vegetación original, ya que entre 1973 a 2003 se perdió el 80% de la selva alta perennifolia (Salazar-Conde *et al.*, 2004); el BS se consideró la más cercanas al tiempo cero. Cada unidad de muestreo (UM) contó con cuatro repeticiones distribuidas de manera azarosa en el área de estudio.

Muestro de la vegetación. En cada UM se establecieron cuadrantes de 1200 m^2 (20 x 60 m) donde se realizó un inventario de especies arbóreas y, a cada una de ellas se midió el diámetro normal (1.3 m sobre el suelo), para estas mediciones se utilizó una cinta diamétrica, mientras que la altura fue estimada mediante una pistola Haga. Doce árboles constituyeron cada UM para *E. guineensis* Jacq. por edad del cultivo, para el caso del BS el

diámetro normal mínimo fue de (diámetro natural DN) ≥ 7 cm, de acuerdo a lo sugerido por Rüginitz *et al.* (2009), Cerda *et al.* (2013) y PMC, (2016), para captura de carbono en bosques tropicales. Durante el inventario en el BS a cada individuo se le asignó un número y fueron marcados con etiquetas de aluminio, las cuales fueron sujetadas evitando dañar los arboles, se registraron los nombres comunes de las especies, asimismo, se colectaron especímenes botánicos (hoja, tallo, flor y frutos), para determinar los nombres científicos con la ayuda de especialistas en el herbario de la División de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Para el muestreo del PZ, se utilizó un marco cuadrado de 1 m² (100 cm x 100 cm). El proceso consistió por tirar aleatoriamente el marco dentro de la parcela de 20 m de ancho por 60 m de largo equivalente a 1,200 m² (Cerda *et al.*, 2013) en cuatro repeticiones. En seguida se procedió a cortar con tijeras a ras del suelo el material vegetativo total y se registró su peso fresco. De cada muestra fresca se obtuvieron sub-muestras de aproximadamente (200 g) que se guardaron en bolsas de papel estraza previamente etiquetadas, las cuales fueron transportadas al laboratorio de suelos, plantas y aguas del Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. El secado de los pastos se consiguió a través de una estufa de aire forzado a 60° C, hasta obtener peso constante, determinándose por diferencia el porcentaje de materia seca, entre los pesos iniciales y finales de las muestras (Rudgitz *et al.*, 2009).

Carbono de la biomasa aérea. Para cuantificar el carbono de la biomasa aérea asociada a la palma de aceite se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Ramos-Escalante *et al.*, (2018), la cual se describe como $B = 98.349 \cdot h + 737.41$, en donde B es la biomasa aérea estimada (kg árbol⁻¹), h es la altura total en m y para las hojas, se estimó como el equivalente al 65% de la biomasa del estípite (Brown, 1997). Por otro lado, se obtuvieron muestras del estípite (1.3 m sobre el suelo) y de las hojas 9, 17 y 25 de cada planta (Ng, 2003b), de ellas se seleccionaron seis folíolos de la parte media (tres de ambos lados) y una fracción de 5 cm de raquis (RQ), de la parte central de la hoja; esto con la finalidad de determinar el porcentaje de C en cada parte fisiológica de *E. guineensis* Jacq. El contenido de C en las muestras de biomasa (tallo y hojas), se determinó con un analizador automático de C y N (Perkin Elmer, Serie II, 2400).

Para determinar el C de la biomasa arbórea en el bosque secundario (BS), se utilizó la ecuación $B = 0.0673 \times (\rho D^2 H)^{0.976}$ propuesta por Chave *et al.* (2014), en donde B es la

biomasa aérea estimada (kg árbol^{-1}), D es el diámetro normal (cm), H es la altura total en m, y ρ es la densidad de la madera en g cm^{-3} . Los valores de densidad de la madera se obtuvieron de la Global Wood Density Database (Zanne *et al.*, 2009) y de Ordoñez *et al.* (2015).

Para el cálculo del contenido de C en la biomasa arbórea de PA y BS, se empleó la fórmula propuesta por el IPCC (2003): $C = B \cdot FC$, donde C es el carbono en la biomasa arbórea (kg), B es la biomasa arbórea (kg) y FC Fracción de C (0.05)

Mientras tanto, para la estimación del contenido de C en la vegetación no arbórea PZ, se empleó la fórmula propuesta por Rudgitz *et al.* (2009). El cual se calcula a partir del tamaño del marco (100cm x 100cm) convirtiendo las unidades de muestro de kg C a T C mediante la siguiente formula: $\Delta\text{CBN (t C ha}^{-1}) = (10000 \text{ m}^2/1 \text{ m}^2) \times ((\sum\Delta\text{CBN}_{\text{muestras}}/\text{número de muestras}) / 1000)$, donde:

$\Delta\text{CBN} = \text{Cantidad de carbono en la biomasa de vegetación no arbórea}$
(t C ha⁻¹);

$\Delta\text{CBN}_{\text{muestras}} = \text{sumatoria de la cantidad de carbono de todas las muestras}$
(Kg C m⁻²);

Factor 1000 = conversión de las unidades de la muestra de kg MS a t MS

Factor 10000 = conversión del área a hectárea,

Análisis de los datos

Para determinar significancia estadística en el almacenamiento de carbono en los diferentes tratamientos, los datos fueron analizados mediante estadística paramétrica, realizando un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de media por Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$, usando el paquete estadístico Statgraphics® centurión XVI.

RESULTADOS

Estimación de la biomasa área en la palma de aceite.

La biomasa aérea total (BAT) promedio en PA fue de 1.44 ± 0.6 Mg planta⁻¹ en el PA5 años, 1.83 ± 0.9 Mg planta⁻¹ en PA8 años y 3.16 ± 1.2 Mg planta⁻¹ en el PA18 años, correspondientes a 48, 61 y 106 Mg de BAT ha⁻¹, respectivamente (Tabla 1 y Figura 1). Las menores cantidades de BAT se encontraron en PA5 y PA8 años, y el mayor valor fue en PA18 años indicando que la mayor BAT se encuentra en plantas adultas. Esto ocurre, a pesar que el diámetro normal (DN) promedio del PA5 y PA8 años son superiores respecto al PA18 años (Tabla 1).

Table 1. Datos dasométricos en tres edades de *Elaeis guineensis* Jacq. en la región Sierra de Tabasco, México (Valor de las medias \pm desviación estándar)

Edad (Años)	DN (cm)	Ap (m)	BAT (Mg)	C total (%)	Mg C ha ⁻¹
5	79.5 \pm 5.7	1.4 \pm 0.03	1.44 \pm 0.6	39.5 \pm 7.5	348.8 \pm 1.3
8	81.1 \pm 8.1	3.8 \pm 0.58	1.83 \pm 0.9	47.2 \pm 9.0	520.2 \pm 26.9
18	74.1 \pm 6.6	12.0 \pm 0.71	3.16 \pm 1.2	50.2 \pm 10.5	1091 \pm 39.9

n=12 plantas por edad de la plantación. El porcentaje de carbono total, se obtuvo a partir de una muestra del tallo. Diámetro normal (DN), Altura de plantas (Ap), biomasa aérea total (BAT). La cantidad de C por planta se obtuvo a partir de la estimación de biomasa del tallo.

Porcentaje de C en diferentes partes de la palma de aceite

De manera general, el mayor porcentaje de C en el agrosistemas de *E. guineensis* Jacq., se observa en los estípites (EST) con respecto a los foliolos (FL) y el raquis (RQ); en PA5 años fue de 39.7%, en PA8 años fue de 45.9% y en PA18 años fue de 54.9% (Tabla 2). Mientras tanto, los FL de las plantas de PA5 registraron mayor porcentaje de C con 51.3% y los valores más bajos fueron en PA8, similar con las PA18 años entre 36.7 a 38.8% (Tabla 2). En el RQ los promedios fueron los más bajos y oscilaron entre el 27% en PA5 hasta 28.6% en PA18 años (Tabla2).

Table 2. Contenido de Carbono (%) en diferentes partes fisiológicas de la palma de aceite en Tabasco, México (media \pm desviación estándar).

Edad (años)	EST	FL	RQ
5	39.7 \pm 8.7	51.3 \pm 3.8	27.0 \pm 5.6
8	45.9 \pm 5.5	36.7 \pm 8.3	25.6 \pm 10.4
18	54.9 \pm 6.5	38.8 \pm 9.1	28.6 \pm 5.0

Abreviaturas: Estípite (EST), Foliolos (FL), Raquis (RQ), n12= número de plantas por cada edad de plantación.

Biomasa aérea y potencial de captura de C en diferentes edades de palma de aceite en la zona Sierra de Tabasco, México.

La mayor biomasa aérea total (BAT) de los agrosistema de palma de aceite se observó en plantaciones de PA18 años con valor de 106 Mg ha⁻¹, le sigue la plantación de PA8 con 61 Mg ha⁻¹ y PA5 años con 48 Mg ha⁻¹ (Figura 1). El agrosistema de palma de aceite, tiene un potencial de captura de C de 19.20 Mg C ha⁻¹ en PA5, 28.55 Mg C ha⁻¹ en PA8 y 60.08 Mg C ha⁻¹ en PA18; el 62 % se concentra en el tallo (Estípite) y el 48 % en las hojas (Tabla 2). La tasa media de fijación anual de carbono fue de 3.9 Mg C ha⁻¹ en el (PA5); 9.5 Mg C ha⁻¹ en el (PA8), y 6.1 Mg C ha⁻¹ en el (PA18) (Figuras 1 y 4).

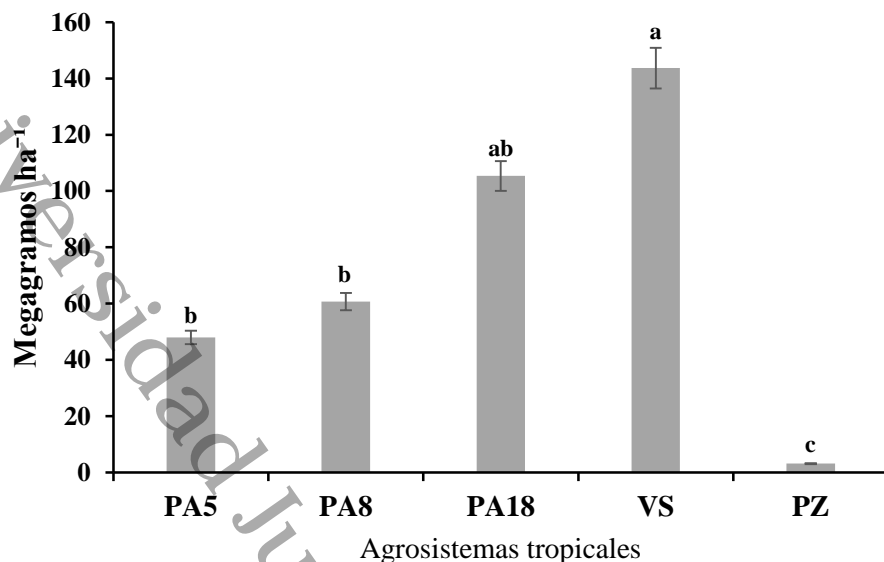


Figura 1. Estimación de la biomasa aérea total en agrosistema tropicales en Tabasco, México. Letras diferentes entre agrosistemas representa diferencia significativa ($P < 0.05$). PA5=palma de aceite de cinco años; PA8=palma de aceite de ocho años; PA18=palma de aceite de dieciocho años; VS= bosque secundario y PZ=pastizales.

Biomasa del bosque secundario

En el bosque secundario (BS) la biomasa aérea total se obtuvo a partir de una muestra de 196 árboles correspondientes a 14 familias, y se encontraron cuatro especies más frecuentes: *Thevetia ahouai*, *Vochysia guatemalensis* J.D. Smith, *Alibertia edulis* y *Enterolobium cyclocarpum*, cuyos diámetros variaron de 7.6 a 76 cm; se observa que el 80% se concentran en las clases diamétricas de 7 a 34 cm, mientras que la altura presentaron una distribución donde la mayoría se concentran en las clases de 5 m a 11 m, 12 m a 17 y 30 m a 35 m; esto obedece a que en las tres clases se concentre el 76 % del total de los árboles (Figura 2 y 3). Por lo tanto, el BS registró la mayor cantidad de biomasa aérea total de los cinco agrosistemas con un total de 143.65 Mg ha⁻¹ correspondiente a un secuestro de C 72 Mg ha⁻¹ durante 20 años, lo cual significa un almacenamiento de C de 3.6 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Figuras 1 y 4).

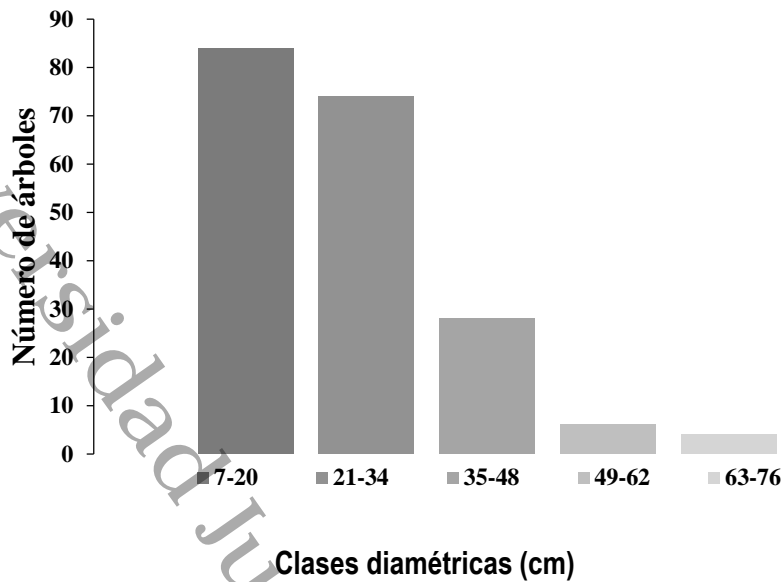


Figura 2. Número de árboles tropicales distribuidos por clase diamétrica en bosque secundario.

Biomasa en pastizal

La biomasa aérea del tratamiento PZ corresponde al pasto mejorado *Brachiaria humidicola* como monocultivo de más de 20 años de edad; principalmente el uso ha sido para la alimentación de ganado bovino en pastoreo extensivo. Los datos obtenidos, muestran niveles de biomasa de 2.9 hasta 3.3 Mg ha⁻¹ correspondiente a 1.6 Mg C ha⁻¹ en promedio. Este sistema tiene muy baja tasa de fijación anual con apenas 0.08 Mg C ha⁻¹, por lo tanto, es el agrosistema con menor capacidad de fijar C almacenado en la biomasa aérea total (Figura 1 y 3).

DISCUSIÓN

Estimación de la biomasa aérea por planta

La BAT por planta se incrementó considerablemente conforme aumentó la edad del cultivo (Tabla 1). En las PA5 y PA8 años de edad se presentaron los valores más bajos en la BAT entre 45.50 y 57.80 % respectivamente, con respecto a los 3.16 ± 1.2 Mg planta⁻¹ en PA18 años. Los mayores contenidos de biomasa sobre el suelo se obtuvieron en palmas adultas y la variable que más influyó fue la altura; debido a que el crecimiento en diámetro de esta oleaginosa tiene lugar en los primeros 3 y 4 años de edad, durante la formación de la base del tallo cuyo diámetro ya no aumentará una vez que haya alcanzado los 40–60 cm de DN (Aholoukpe *et al.*, 2013; Aholoukpe *et al.*, 2018). Lo anterior quedó de manifiesto por el valor promedio en altura de 12.0 ± 0.71 m en las PA18, que fue superior con respecto a las PA5 con 1.4 ± 0.03 m y PA8 años con 3.8 ± 0.58 m (Tabla 1). Estudios realizados en Sudamérica por Goodman *et al.* (2013) y en Malasia por Asari *et al.* (2013) y Sanquetta *et al.* (2015) argumentan que la biomasa aérea se correlaciona significativamente con la edad y con la longitud del tallo, similar a lo que ocurrió con nuestro estudio. Por su parte, Ramos-Escalante *et al.* (2018), en el soconusco de Chiapas, evaluaron la biomasa aérea cuando el sistema tiene aproximadamente 12 años de edad, la BAT fue de 1104.34 ± 87.85 kg planta⁻¹, sus resultados se asemejan a nuestros tratamientos en el cultivo en PA5 y PA8 años cuando el agrosistema tiene una edad joven. A su vez Aranda-Arguello *et al.* (2018) estimaron la biomasa aérea en palmas de 12 años en diferentes regiones de Chiapas y reportan en promedio $1,877.3$ kg planta⁻¹, estos valores son similares a nuestros resultados en PA5 y PA8 años, pero por debajo del valor de 3.16 Mg por planta⁻¹ obtenido en PA18 años (Tabla 1). Al respecto Khalid *et al.* (1999), mencionan que en plantaciones de palma de aceite de 23 años con diámetro natural (DN) en promedio de 43 cm y altura total de 7.48 m con método directo; obtuvieron en promedio 627 kg planta⁻¹, sus resultados contrastan mucho con los promedios determinados en el agrosistema cuando tienen una edad de PA5, PA8 y PA18 años en nuestra investigación, sin embargo, las variables de DN y altura, están por debajo del promedio en nuestro estudio (Tabla 1), por lo tanto, pudieran estar influyendo en el resultado antes mencionado. Otro factor decisivo según Ng *et al.* (2003a) y Aholoukpe *et al.* (2018) es el crecimiento del estípite de la planta el cual va a depender del origen genético de la palma. En este mismo sentido Aholoukpe *et al.* (2018) argumentan que la variedad de *DLM* Deli \times La Mé genotype., a la edad entre 16 y 29 años tendría una altura entre 3.8 a 9.2 similares a las encontradas por Khalid *et al.* (2000) lo cual explicaría

los bajos contenidos en la biomasa aérea con respecto a las palmas de nuestro estudio. De acuerdo con Morel *et al.* (2011) el cultivo de *E. guineensis* Jacq. después de los 20 años empieza con la abscisión de las bases peciolares, lo que según Khalid *et al.* (2000) representa alrededor del 22 % de la biomasa del tallo. Lo que también podría explicar los bajos contenidos en la biomasa aérea en *E. guineensis* Jacq después de la edad de 20 años.

Biomasa aérea total por unidad de superficie en tres edades diferentes de *Elaeis guineensis* Jacq.

En la figura 1 se muestra un incremento de la BAT con respecto a la edad del cultivo, pasando de 48 y 61 Mg ha⁻¹ en palmas jóvenes de cinco y ocho años de edad, respectivamente, hasta alcanzar 106 Mg ha⁻¹ en la edad de 18 años. La BAT acumulada en las PA5 y PA8 años, se asemejan a los resultados de Kotowska *et al.* (2015) en Indonesia en plantaciones de ocho años, donde encontraron 47.3 t ha⁻¹ y en 15 años 37.3 t ha⁻¹. Por su parte, Asari *et al.* (2013) en Malasia en plantaciones entre 6 y 23 años de edad, registraron en la BAT promedios de 27.67, 55.06 y 73.66 Mg ha⁻¹ clasificadas en plantación intermedia, productiva y madura; estos resultados son similares a los de las palmas jóvenes (PA5 y PA8 años) de nuestro estudio, ambos autores Asari *et al.* (2013) y Katowska *et al.* (2015) utilizaron el método indirecto y se asocian a condiciones edafoclimáticas similares a nuestra investigación; que de acuerdo con Zavala-Cruz *et al.* (2016) y Brindis-Santos *et al.* (2020), nuestros tratamientos se ubican en suelos bien desarrollados, con un horizonte Bt de iluviación con alto contenido de arcilla, con pH de moderado a fuertemente ácidos, así como relieves de lomeríos \leq a 30% con alturas entre ≥ 10 a ≤ 70 msnm. Sin embargo, cuando el cultivo se encuentra en una edad madura los resultados de Asari *et al.* (2013) se encuentran ligeramente por debajo de los obtenidos en este estudio para palmas de 18 años. Estudios realizados por Corley *et al.* (1971) y Corley *et al.* (2003) con plantaciones ≤ 5 años de edad; argumentan que el cultivo puede alcanzar en la BAT hasta 85 y 90 t ha⁻¹, 50% más que en nuestros resultados encontrados en PA5 y PA8 años. En contraste Thenkabail *et al.* (2004), estimaron 29.5 y 29.88 Mg ha⁻¹ en plantaciones entre 1 y 5 años mediante imágenes satelitales (IKONOS Satellite Images) en dos áreas de África occidental; mientras que Morel *et al.* (2012) con imágenes de ALOS PALSAR (Radar de Apertura Sintética de Banda L por Satélite Avanzada de Observación de Tierras),

registraron promedios de BAT de 25.5 y 40 t ha⁻¹ en plantaciones de 5 y 10 años de edad, respectivamente, contenidos menores a los encontrados en nuestra investigación; sin embargo, estas técnicas difieren de la aplicada en nuestro estudio.

Khalid *et al.* (1999) en una investigación realizada en plantaciones de 23 años, argumentan que la cantidad total de biomasa sobre el suelo es de aproximadamente 85 t ha⁻¹ y el estúpido contribuye con la mayor parte de la biomasa, aproximadamente el 48%. Estos mismos hallazgos los confirman Sanquetta *et al.* (2015) quienes reportan 90 t ha⁻¹ en la BAT a la edad de 25 años. Por su parte, Klaarenbeeksingel (2009), menciona que la cantidad de biomasa aérea sobre las plantaciones de palma aceitera varían de 50 a más de 100 t ha⁻¹ hacia el final de la vida útil (20-25 años); estos contenidos de BAT son similares a los resultados encontrados en las plantaciones de PA18 años de nuestro estudio con 106 Mg ha⁻¹.

Potencial de captura de C de palma de aceite

El almacenamiento de C almacenado en la biomasa de la palma de aceite, depende principalmente de la edad de la plantación, y se relaciona fuertemente con factores edafoclimáticos (Leblanc *et al.*, 2006; Lamade, 2009). Los valores observados en la Figura 4, se calcularon a partir de una densidad de siembra 143 plantas ha⁻¹ en las PA5, PA8 y PA18 años; lo cual nos permitió estimar el potencial de captura de C con valores de 19.19, 28.54 y 60.05 Mg C ha⁻¹ respectivamente; así como tasa media fija anual de 3.84, 9.51 y 6.01 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Los valores y la tasa fija anual son similares a los 22.68 Mg C ha⁻¹ en plantas jóvenes de 7 años reportadas por Leblanc *et al.* (2006) en Costa Rica; así como 15.01, 23.6 y 53.0 Mg C ha⁻¹, reportadas en la península de Malasia en plantaciones entre 5 y 16 años de edad (Ng *et al.*, 1968). Otro estudio realizado en el mismo país por Corley *et al.* (1971), reportan que a los 5 años de edad *E. guineensis* Jacq., tiene un potencial de captura de 14.95, a los 8 años tiene 18.6 y a los 18 años almacena 36.0 Mg C ha⁻¹. Syahrudin (2005) en Indonesia evaluó el C en plantaciones con edades de 10, 20 y 30 años; y los valores promedios fueron 35.4, 41.7 y 55.3 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Ambos resultados se asemejan en los contenidos de C de nuestro estudio (Figura 4). En contraste, los estudios de Pulhin *et al.* (2014) y Ramos-Escalante *et al.* (2018), argumentan que *E. guineensis*. tiene un potencial de captura de C de 55.0 y 76.18 Mg C ha⁻¹ en

plantaciones de 9 y 12 años edad; estos valores superan a lo observado en nuestra investigación cuando el cultivo tiene una edad similar, sin embargo, su método (destrutivo) difiere al utilizado para nuestra zona de estudio.

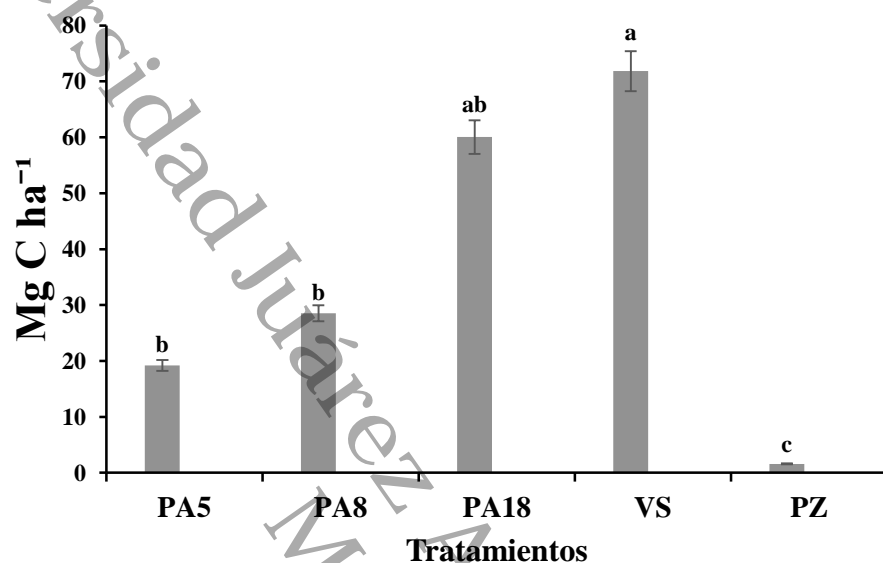


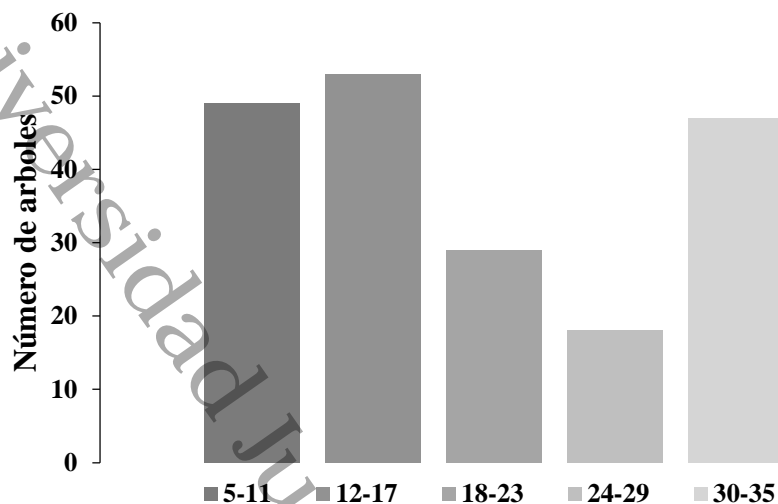
Figura 3. Carbono almacenado en la biomasa de agrosistemas tropicales. Letras diferentes entre tratamientos representan diferencia significativa ($P = 0.05$). PA5=palma de aceite de cinco años; PA8=palma de aceite de ocho años; PA18=palma de aceite de dieciocho años; VS=bosque secundario y PZ= pastizal.

De acuerdo a nuestros resultados, podemos argumentar que el cultivo de palma de aceite alcanza su punto máximo de captura de C entre las edades de 8 a 18 años, donde la BAT alcanzó entre (29.0 a 60.0 Mg C ha⁻¹) (Figura 4). Sin embargo, cuando, el cultivo supera la edad de 20 años empieza a disminuir su potencial de almacenamiento de C; esto de acuerdo con Khalid *et al.* (1999) en donde a la edad de 23 años el cultivo captura alrededor de 41.7 Mg C ha⁻¹; mientras que, según Henson, (2003) a los 25 años de edad tiene un potencial de 25.7 Mg C ha⁻¹ y, a su vez Adachi *et al.* (2011) mencionan que a los 27 años este sistema almacena en la BAT 18.3 Mg C ha⁻¹, lo que correspondería a una disminución del 30, 60 y 70 % , con respecto al valor de 60.0 Mg C ha⁻¹ almacenado a la edad de 18 años en nuestra investigación. De acuerdo con Henson, (2004) y Smith *et al.* (2012) la palma de aceite tienen una vida económica de 25 a 30 años; por ello, la disminución en la captura de C en la BAT, se atribuye a diversos factores: 1) disminuye la producción de frondas de forma

natural; 2) las bases de las frondas se pierden debido a la separación en el tallo; 3) enfermedades (Turner,1981; Singh,1992; Hashim y Tey, 2008; Morel *et al.*, 2011); y 4) manejo menos intensivo, provocando menor rendimiento de racimo de fruto fresco (RFF). Aunque el presente estudio no tiene una edad mayor a los 20 años, las investigaciones antes mencionadas indican que este sistema disminuye su BAT entre 25 y 30 años, por lo que explicaría el valor encontrado en nuestro estudio en palmas de 18 años.

Almacenamiento de C en la biomasa aérea en el bosque secundario y pastizal.

En el presente estudio el pastizal fue el agrosistema que almacenó menos carbono total. En contraste, el bosque secundario (BS) fue el que mayor C almacenado contiene en la BAT (Figura 4). El pastizal fue significativamente menor en su contenido total de C en comparación con los agrosistemas de palma de aceite en diferentes edades, mientras que, el BS mostró significativamente ($p = 0.05$) el mayor valor con 72 Mg C ha^{-1} en la biomasa aérea y, con tasa fija anual de 3.6 Mg C ha^{-1} (Figura 4). Se encontraron diferencias estadísticas ($p = 0.05$) en el almacenamiento de carbono en biomasa aérea entre los agrosistemas evaluados. El BS presentó el mayor almacenamiento de carbono, seguidas por las plantaciones de palma de aceite en diferentes edades (PA5 con 19.19, PA8 con 28.54 y PA18 con $60.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$). El pastizal, fue el agrosistema que aportó la menor cantidad de carbono en la biomasa aérea con 1.6 Mg C ha^{-1} en comparación con los otros sistemas evaluados y, con tasa fija anual de solo $0.08 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Figura 3). El BS presentó al valor de 72 Mg C ha^{-1} en la BAT (Figura 4), resultados que concuerdan con estudios realizados en Colombia, Venezuela, Perú y México, países geográficamente ubicados en el trópico (Saldarriga *et al.*, 1988; Lapeyre *et al.*, 2004; Hughes *et al.*, 2004). La BAT en el BS (20 años de edad) en Perú, reporta valor de $62.1 \text{ Mg C ha}^{-1}$, se señala que está captura de C la realizan especies forestales por debajo de los 30 cm de DN (Lapeyre *et al.*, 2004), similar a las clases diámetricas de nuestra investigación. Asimismo, en la sucesión secundaria en los países Colombia y Venezuela, con edades entre 9 a 12 años, se han reportado valores de 75 y 84 Mg C ha^{-1} , respectivamente (Saldarriga *et al.*, 1988). Por su parte Hughes *et al.* (1999), en México argumentan que la VS que se encuentra en edades entre 16 a 20 años puede almacenar en la BAT valores de 88 y 269 Mg C ha^{-1} , respectivamente.



Clases de alturas (m)

Figura 4. Número de árboles tropicales distribuidos por clases de altura en el bosque secundario.

Debido a la edad del BS y a la diversidad de especies que existe en este tipo de agropaisajes (Carreón-Santos *et al.*, 2014; López-Pérez *et al.*, 2014; Zamaro-Crescencio *et al.*, 2018); no es posible compararlas directamente con las plantaciones de palma de aceite con una edad específica. Pero, podemos cuantificar las pérdidas de almacenamiento de C cuando se realiza la conversión de BS al monocultivo de palma de aceite; con el valor observado en la captura de C en el BS encontramos que, cuando el cultivo de palma de aceite tiene una edad relativamente joven entre 5 y 8 años respectivamente, el almacén de C disminuye en promedio 67% en la BAT, mientras que, cuando el cultivo llega a una edad de 18 años reduce solo el 16%, con respecto a los Mg C ha⁻¹ reportados en el BS; mientras tanto cuando se hace el cambio de uso de suelo de BS a PZ los Mg C ha⁻¹ disminuyen en un 100% (Figura 3). Por otra parte, es importante mencionar que el almacenamiento de C aumenta más del 100% en las tres edades evaluadas del agrosistema de palma de aceite, cuando se hace la conversión de pastizal a palma de aceite.

La expansión de las plantaciones de palma aceitera en el país debe cumplir con la regulación interna, y debe dirigirse a las tierras anteriormente deforestadas, en particular los

cultivos y pastos degradados, evitando el aumento de la deforestación en las selvas y bosque secundario.

CONCLUSIÓN

Las plantaciones de Palma de aceite de 18 años contienen el mayor valor en la biomasa aérea total (BAT) con 106 Mg ha^{-1} con respecto a las palmas jóvenes PA5 y PA8 años. Asimismo, se pudo observar que la BAT de la palma de aceite, aumenta con la longitud del estípite; debido a que los contenidos de BAT y las reservas de C aumentan conforme a la edad del cultivo.

El almacenamiento de carbono de los agrosistemas de Palma de aceite, Bosque secundario y Pastizal se encuentra principalmente en el BS con 20 años de edad con 72 Mg C ha^{-1} . En la biomasa aérea en las PA5, PA8 y PA18 años almacenan carbono entre 19.19 y $60.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y el pastizal inducido 1.6 Mg C ha^{-1} . El carbono de la biomasa aérea se almacena principalmente en el BS debido a la diversidad de especies arbóreas que están presente en este sistema. Los resultados muestran que *E. guineensis* Jacq con edades de 5, 8 y 18 años superan en 100% al agrosistema de Pastizal con respecto a los contenidos de C almacenado en la BAT.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para estudios de posgrado. Al National Science Foundation Partnerships in International Research and Education (NSF), a través del proyecto “Sustentabilidad, Servicios Ecosistémicos y Desarrollo de la Bioenergía en las Américas” (PIRE) por el financiamiento parcial en la fase de campo del presente proyecto de investigación.

LITERATURA CITADA

- Adachi M, Ito A, Ishida A, Kadir WR, Ladpala P, Yamagata Y (2011) Carbon budget of tropical forests in Southeast Asia and the effects of deforestation: an approach using a process-based model and field measurements. *Biogeosciences*, 8: 2635-2647. doi.org/10.5194/bg-8-2635-2011
- Aholoukpè H, Dubos B, Flori A, Deleporte P, Amadji G, Chotte JL, Blavet D (2013) Estimating aboveground biomass of oil palm: allometric equations for estimating frond biomass. *Forest Ecology and Management*, 292: 122-129. doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.027
- Aholoukpè HNS, Dubos B, Deleporte P, Flori A, Amadji LG, Chotte JL, Blavet D (2018) Allometric equations for estimating oil palm stem biomass in the ecological context of Benin, West Africa. *Trees*, 32: 1669-1680. doi.org/10.1007/s00468-018-1791-z
- Aranda-Arguello R, Ley-de-Coss A, Arce-Espino C, Pinto-Ruiz R, Guevera-Hernández F, Raj-Aryal D (2018) Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. *Agronomía Mesoamericana*, 29:629-637. doi:10.15517/ma.v29i3.32076
- Asari N, Suratman MN, Jaafar J, Khalid MM (2013) Estimation of aboveground biomass for oil palm plantations using allometric equations. In 4th Int. Conf. on Biology, Environment and Chemistry. 58: 110-114. doi:10.7763/IPCBE.
- Avendaño DMH, Acosta MM, Carrillo FA, Etchevers JDB (2009) Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32: 233-238.
- Brindis-Santos AI, Palma-López DJ, Zavala-Cruz J, Mata-Zayas EE, López-Bustamante YI (2020) Paisajes geomorfológicos relacionados con la clasificación de los suelos en Planicies y Terrazas de Tabasco, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72:1-17. doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a090919
- Casanova-Lugo F, Petit-Aldana J, Solorio-Sánchez J (2011) Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17:133-143. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.047
- Carreón-Santos RJ, Valdez-Hernández JI (2014) Estructura y diversidad arbórea de bosque secundario derivada de una selva mediana subperennifolia en Quintana Roo.

- Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 20: 119-130.
doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.06.023
- Cerda B R, Espin CT, Cifuentes M (2013) Carbono en sistemas agroforestales de cacao de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 49: 33-41. <http://hdl.handle.net/11554/7744>
- Corley RHV, Tinker PB, (2003) *The Oil Palm*, 4th edition. Blackwell Science, Ltd., Oxford UK. 562 p.
- Corley RHV, Hardon JJ, Tan GY (1971) Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica*, 20: 307-315.
- Cruz-Angón A, Cruz-Medina J, Mata-Zayas EE (2019) Introducción. En: La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado. Vol. III. CONABIO, México. 11-12p.
- Chávez-Aguilar G, Ángeñes-Pérez G, Pérez-Suárez M, López-López MA, García-Moya E, Wayson C (2016) Distribución de biomasa aérea en un bosque *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Maderay Bosques*, 3:23-26. doi.org/10.21829/myb.2016.2231454
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WB, *et al.* (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20: 3177-3190. doi.org/10.1111/gcb.12629
- Chase LD, Henson I E (2010) A detailed greenhouse gas budget for palm oil production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 8:199-214. doi.org/10.3763/ijas.2010.0461
- Etchevers BJD, Monreal MC, Hidalgo MC, Acosta MM, Padilla CJ, López RR (2015) Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados, México. 1ra ed. 29 p.
- Fernandes CDA, Matsumoto SN, Fernandes VS, (2018) Carbon stock in the development of different designs of biodiverse agroforestry systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22:720-725. doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p720-725.

- Gómez-Díaz JD, Monterroso-Rivas AI, Tinoco-Rueda JA, Etchevers-Barra JD(2012) Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana*, 30: 177-187.
- Goodman RC, Phillips OL, del Castillo Torres D, Freitas L, Cortese ST, Monteagudo A, Baker T R (2013) Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, 310: 994-1004. doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045
- Henry M, Besnard A, Asante WA, Eshun J, Adu-Bredu S, Valentini R, Saint-André L (2010) Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260:1375-1388. doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040
- Henson IE (2003) The Malaysian national average oil palm: concept and evaluation. *Oil Palm Bulletin*, 46: 15-27.
- Henson, IE (2004) Estimating maintenance respiration of oil palm. *Oil Palm Bulletin*, 48: 1-10.
- Hughes RF, Kauffman JB, Jaramillo VJ (1999) Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology*, 80: 1892-1907. [doi.org/10.1890/0012-9658\(1999\)080\[1892:BCANDO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1999)080[1892:BCANDO]2.0.CO;2)
- INEGI, (2017) Anuario estadístico y geográfico de Tabasco 2017: México, D.F., Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, 440 p.
- Khalid H, Zin ZZ, Anderson JM (1999) Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation. I. Above-ground biomass. *Journal of Oil Palm Research*, 11: 23-32.
- Kotowska MM, Leuschner C, Triadiati T, Meriem S, Hertel D (2015) Quantifying above- and belowground biomass carbon loss with forest conversion in tropical lowlands of Sumatra (Indonesia). *Global change biology*, 21: 3620-3634. doi.org/10.1111/gcb.12979
- Kiyono Y, Monda Y, Toriyama J, Chaddy A, Goh K J, Melling L (2015) Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute*, 14: 147-158. doi.org/10.20756/ffpri.14.3_147

- Kho LK, Jepsen M R (2015) Carbon stock of oil palm plantations and tropical forests in Malaysia: A review. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 36: 249-266. doi.org/10.1111/sjtg.12100
- Klaarenbeeksingel FW (2009) Greenhouse gas emissions from palm oil production. Brinkmann Consultancy, Hoevelaken, The Netherlands, 57 p.
- Lapeyre T, Alegre J, Arévalo L (2004) Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú. *Ecología aplicada*, 3: 35-44.
- Lamade E, Bouillet JP (2005) Carbon storage and global change: the role of oil palm. *OCL. Oléagineux Corps gras Lipides*, 12: 154-160.
- Leblanc H, Russo R, Cueva JJ, Subía E (2006) Fijación de carbono en palma aceitera en la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical*. 2:143-148.
- López-Pérez D, Castillo-Acosta O, Zavala-Cruz J, Hernández-Trejo H (2014) Estructura y composición florística de la bosque secundario en tres regiones de la sierra norte de Chiapas, México. *Polibotánica*, 37: 1-23.
- Morel, A. C., Saatchi, S. S., Malhi, Y., Berry, N. J., Banin, L., Burslem, D., y Ong, R. C. 2011. Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah, Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data. *Forest Ecology and Management*, 262(9), 1786-1798. doi.org/10.1016/j.foreco.2011.07.008
- Morel AC, Fisher J B, Malhi Y (2012) Evaluating the potential to monitor aboveground biomass in forest and oil palm in Sabah, Malaysia, for 2000–2008 with Landsat ETM+ and ALOS-PALSAR. *International Journal of Remote Sensing*, 33:3614-3639. doi.org/10.1080/01431161.2011.631949
- Ng SK, Thamboo S, de Souza P (1968) Nutrient contents of oil palms in Malaya. II. Nutrients in vegetative tissues. *Malaysian Agricultural Journal* 46: 332–90.
- Ng SK, von Uexküll H, Härdter R (2003a) Botanical aspects of the oil palm relevant to crop management. En: Fairhurst T, Härdter R (eds) *Oil palm management for large and sustainable yields*. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), 13–26 p.
- Ng SK, Thong CK, Khaw CH, Ooi HSH, Leng KY, Kayaroganam P (2003b) Clonal oil palm: production, yield performance and nutritional requirements. En: Fairhurst T,

- Hårdter R (eds) Oil palm management for large and sustainable yields. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Potash Institute (IPI), pp 13–26
- Palma-López DJ, Cisneros DJ, Moreno CE, Rincón-Ramírez JA, (2007) Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable: Villahermosa, Tabasco, México, Colegio Postgraduados ISPROTAB-FUPROTAB. 184 p.
- Pulhin FB, Lasco RD, Urquiola JP (2014) Carbon sequestration potential of oil palm in Bohol, Philippines. *Ecosystems and Development Journal (Philippines)*. 4: 14-19.
- Programa Mexicano del Carbono AC (2015) Manual de Procedimientos Inventario de Carbono+. Estudio de Factibilidad Técnica para el Pago de Bonos de Carbono en el Estado de México (RETUS con BASES EDOMEX). Coordinador: Fernando Paz Pellat. Colaboradores: Fabiola Rojas-García, Julio Cesar Wong González y José Ignacio Pulido-Ponce. Texcoco, Estado de México. 57p.
- Ramos-Escalante G, Ley de-Coss A, Arce-Espino C, Escobar-España JC, Raj-Aryal D, Pinto-Ruíz R, Guevara-Hernández F, Guerra-Medina GE (2018) Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52: 671-683.
- Rivera-Méndez YD, Rodríguez DT, Romero HM (2017) Carbon footprint of the production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fresh fruit bunches in Colombia: *Journal of cleaner production*, 149: 743-750. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.149
- Rügnitz MT; Chacón ML, Porro R (2009) Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales 1. eds. Lima, Perú: Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF)/Consorcio Iniciativa Amazônica (IA). 79 p.
- Salazar-Conde EC, Zavala-Cruz J, Castillo-Acosta O Cámara-Artigas R (2004) Evaluación espacial y temporal de la sierra madrigal, Tabasco, México (1973-2003). *Investigaciones geográficas, boletín del instituto de geografía. UNAM*, 54: 7-23.
- Saldarriaga J G, West DC, Tharp ML, Uhl C (1988) Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *The Journal of Ecology*, 76: 938-958. doi: [10.2307/2260625](https://doi.org/10.2307/2260625)
- Salvador-Morales P, Cámara-Cabrales LDC, Martínez-Sánchez JL, Sánchez-Hernández R, Valdés-Velarde E (2019) Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arborea

- en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y bosques*, 25:1. [dx.doi.org/10.21829/myb.2019.2511638](https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638).
- Servicio de información agroalimentaria y pesquera SIAP (2019) Anuario estadístico de la producción agrícola (en línea). Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Singh G, (1991) Ganoderma-the scourge of oil palm in the coastal area. En Ariffin, D., Sukaimi, J.(Eds) *Proceedings of Ganoderma workshop*, PORIM Bangi, 11 September 1990. Palm Oil Research Institute of Malaysia, Selangor. 7-35 p.
- Siegel S, Castellan NJ, (1995) *Estadística no paramétrica: aplicada a las ciencias de la conducta*, 4ta ed. Trillas. México. 437p.
- Sinha S, Jeganathan C, Sharma LK, Nathawat MS (2015) A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12: 1779-1792. doi:10.1007/s13762-015-0750-0.
- Schlesinger W (1997) *Biogeochemistry: an Analysis of Global Change*. San Diego, CA. USA: Academic Press. 588 p.
- Sanquetta CR, Péllico Netto S, Dalla Corte AP, Rodrigues AEL, Behlin A, Sanquetta MNI (2015) Quantifying biomass and carbon stocks in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Northeastern Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 10: 4067-4075. doi:10.59897/AJAR2015.9582.
- Smith DR, Townsend TJ, Choy AW, Hardy IC, Sjögersten S (2012) Short-term soil carbon sink potential of oil palm plantations. *GCB bioenergy*, 4:588-596. doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01168.x
- Turner PD (1981) *Oil palm diseases and disorders*. Oxford University Press, Kuala Lumpur. 297 p.
- Thenkabail PS, Stucky N, Griscom BW, Ashton MS, Diels J, Van Der Meer B, Enclona E (2004) Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 5447-5472. doi: [10.1080/01431160412331291279](https://doi.org/10.1080/01431160412331291279)
- Vargas-Simón G (2019) Resumen ejecutivo. Factores de presión. En: *La biodiversidad en Tlaxcala*. Estudio de Estado. Vol. III. CONABIO, México. 17-19 p.

Zanne A, López-González G, Coomes D, Ilic J, Jansen S, Lewis S, Miller R, Swenson N, Wiemann M, Chave J (2009) Global wood density database. doi.org/10.5061/dryad.234

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

Zamora-Crescencio P, Domínguez-Carrasco MDR, Villegas P, Gutiérrez-Báez C, Manzanero-Acevedo LA, Ortega-Haas JJ, Puch-Chávez R (2011) Composición florística y estructura de la vegetación secundaria en el norte del estado de Campeche, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 89: 27-35.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

CAPITULO 6

DISCUSIÓN GENERAL Y CONSIDERACIONES FINALES.

Los sistemas ecológicos son fundamentales como sumideros de carbono, ya que por medio de éstos, el carbono (C) queda retenido en la materia orgánica en descomposición, el suelo y la biomasa (hojas, ramas y raíces). Asimismo, las plantaciones forestales y agrícolas representan opciones como depósitos, fuentes y sumideros de carbono. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue determinar el potencial de almacenamiento de Carbono de los compartimentos de suelo y biomasa vegetal en tres tipos de vegetación de origen antrópico (agrosistemas de palma de aceite, pastizales y bosques secundarios) en la zona Sierra del estado de Tabasco, México.

Para un mejor entendimiento del suelo y el almacenamiento de C en los compartimentos biomasa aérea y suelo en los agrosistemas tropicales estudiados, se elaboró la cartografía de los paisajes geomorfológicos y la clasificación de suelos (Hartemink y Bockheim, 2013). Los paisajes geomorfológicos de Planicies y Terrazas de Jalapa y Tacotalpa en el sur de Tabasco, correspondientes al área de estudio, se relacionaron con la clasificación de los suelos. Se observó que los paisajes están plenamente diferenciados por el tipo de relieve/modelado, ya que en los relieves llanos de posición ligeramente convexa el grupo de suelo dominante fue el Fluvisol. En los paisajes de Terrazas, los grupos de suelos dominantes son Alisols, Luvisols y Lixisols; todos ellos presentan acumulación iluvial de arcilla que forma un horizonte árgico, con concentraciones residuales de óxidos de hierro y aluminio, así como una estructura subangular. Por su parte, en los relieves de valles acumulativos, los grupos asociados son los Histosols y Gleysols con una génesis asociada a las condiciones de anaerobiosis que trae como consecuencia procesos de gleyzación y acumulación de materia orgánica.

Por lo que en este trabajo se encontró que los paisajes geomorfológicos y los tipos de relieves determinan el tipo de unidad de suelo en un ecosistema y son de importancia para diferenciar sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Frank *et al.*, 2020). En este mismo sentido, el suelo es un componente primordial del sistema climático del planeta,

porque cuantitativamente es el segundo reservorio de carbono en la naturaleza, solo precedido por los océanos (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2015). A su vez, la biomasa aérea (ya sea de ecosistemas naturales, sistemas agroforestales, y agrosistemas agrícolas, etc.) es importante en el potencial natural de captura de carbono en sus hojas, tallos, raíces y ramas. Por ello, se hacen las consideraciones sobre las potencialidades del suelo y la biomasa aérea para capturar carbono, partiendo de la preocupación del cambio climático global y del ciclo global del carbono.

El carbono orgánico total en diversos suelos del mundo, se mantiene en promedio entre el 39 y 79 % desde la superficie del suelo hasta los primeros 30 cm, mientras que entre el 58 y 81 % del C se encuentra a una profundidad de 50 cm del suelo (Batjes, 1996). En el presente estudio, la relación C/N en la cronosecuencia de las plantaciones de palma de aceite de cinco, ocho y dieciocho años (PA5, PA8 y PA18 respectivamente), mostraron un reducido potencial de C capturado en la profundidad de 0-60 cm del suelo con respecto al bosque secundario y al pastizal. El bosque secundario almacena mayores contenidos de C y N, pero sugieren que estas mismas variables en el agrosistema de palma de aceite podrían aumentar con el tiempo a niveles iguales o superiores al pastizal. La relación C/N en estos agrosistemas oscila en valores de ≤ 14 , lo que sugiere una tasa de mineralización y ruptura de tejidos rápida de los residuos orgánicos, por lo que serían más susceptibles a generar flujos de C con dominancia de procesos de mineralización, más que humus residual o MOS más resistente a la descomposición.

Los resultados en el contenido de COS -60 cm de profundidad oscilo entre 51 y 52 Mg C ha⁻¹ en las plantaciones de cinco y dieciocho años respectivamente, mientras que en la PA de 8 años es de 45 Mg C ha⁻¹ estos valores se encuentran dentro del rango referido para suelos tropicales. Khasanah *et al.* (2015) reportan que el C almacenado en palmas de aceite de 25 años en Indonesia, presentan valores aproximadamente de 52 Mg ha⁻¹. Rahman *et al.* (2018) mencionan que la perturbación de bosque secundario a palma de aceite después de 29, 39 y 49 años en Sarawak, Malasia, presentan valores similares con 42, 60 y 62 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Por su parte Frazao *et al.* (2013) y Frazao *et al.* (2014) reportan valores entre 23 a 66 Mg C ha⁻¹ en plantaciones de palma de aceite en Brasil con edades entre 4 y 34 años de edad. Por otro lado, Ramos *et al.* (2018) en un sistema agroforestal a

base de producción de palma aceitera y sistema agroforestal de producción de cacao y palma de aceite con edad de 25 años, reportan valores de 58 y 66 Mg C ha⁻¹, respectivamente, en Brasil.

La biomasa aérea total (BAT) en sistemas forestales, sistemas agroforestales y sistemas agrícolas es de utilidad para usos comerciales (biocombustibles, madera, fibra, etc.) y para evaluar los cambios en el uso del suelo con respecto a los flujos del ciclo del carbono (C) (Henry *et al.*, 2010; Aholoukpe *et al.*, 2018; Fernandes *et al.*, 2018). En Tabasco, el cultivo de *E. guineensis* Jacq., se considera que tiene potencial de captura de C en la BAT, por lo que, se comparó con pastizales y bosques secundarios (BS). Para ello, se emplearon ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea total en los agrosistemas de palma de aceite (PA) y bosque secundario, mientras que para el pastizal (PZ), se determinó directamente sobre la materia seca la concentración de C, con lo que se calcularon los contenidos de carbono por hectárea. Los resultados nos indican que las plantaciones adultas de 18 años de edad almacenan alrededor de 60 Mg C ha⁻¹, a pesar de que el DN (diámetro normal a 1.3 m sobre el suelo) promedio de las plantaciones de PA5 y PA8 años son superiores respecto a las PA18 años. Se concluye que el BS captura mayor contenido de C en la BAT con respecto a las PA jóvenes, excepto con las PA18 años donde los contenidos en biomasa aérea y C son similares al BS. Asimismo, las clases de diámetro natural (DN) son superiores en las plantaciones de PA con respecto al BS, sin embargo, las clases de altura en el BS son superiores, por lo que la altura estaría influyendo en la cantidad de C acumulado en la BAT. El pastizal es el agrosistema que almacena menores contenidos de C en la BAT con respecto a las plantaciones de PA y el BS.

La biomasa aérea de la palma de aceite de cinco, ocho y dieciocho años capturó en las hojas y estípites 19.19, 28.54 y 60.05 Mg C ha⁻¹, respectivamente. Dichos valores corresponden al 62% en el estípite y 48 % en las hojas. Estos resultados son similares a los reportados por Leblanc *et al.* (2006) en plantaciones de 7 años en Costa Rica y Ng *et al.* (1968) en Malasia, donde las plantaciones relativamente jóvenes entre 5 y 16 años de edad, sus valores se encuentran en un rango entre 15.01 y 53.0 Mg C ha⁻¹. Por su parte Corley *et al.* (1971) en una cronosecuencia similar a nuestro estudio reportaron valores de 14.95, 18.6 y 36.0 Mg C ha⁻¹ cuando el cultivo tiene una edad de 5, 8 y 18 años, respectivamente. En

contraste, los estudios de Pulhin *et al.* (2014) y Ramos-Escalante *et al.* (2018), argumentan que *E. guineensis* Jacq. tiene un potencial de captura de C de 55.0 y 76.18 Mg C ha⁻¹ en plantaciones de 9 y 12 años edad; estos valores superan en un 57 y 69 % a lo observado en nuestras plantaciones jóvenes (PA5 y PA8 años), sin embargo, cuando las plantaciones tienen 18 años nuestros resultados superan en un 8% al primer trabajo y están por debajo en un 21% del segundo. El método empleado (destrutivo) en ambos trabajos, difiere al utilizado para nuestra zona de estudio (predictivo). Si bien es cierto, que la captura de C disminuye cuando se hace la conversión de bosque secundario (BS) al monocultivo de palma de aceite en promedio en un 67 % a las edades entre 5 y 8 años, cuando este sistema llega a una edad madura de 18 años se reduce solo el 16%, con respecto a los Mg C ha⁻¹ reportados en el BS. Mientras tanto, cuando se hace el cambio de uso de suelo de BS a Pastizal los Mg C ha⁻¹ en la biomasa aérea disminuye más de un 100%. Por otro lado, si comparamos nuestros resultados del agrosistemas de palma de aceite con uno de los sistemas agroforestales emblemáticos del estado de Tabasco y Chiapas, el sistema agroforestal de cacao (SAFC), el cual intercala el cultivo del árbol de cacao (*Theobroma cacao* L.) con árboles de sombra, de manera general nuestros resultados son similares a los reportados por Salvador-Morales *et al.* (2019) en SAFC > 40 años, que registraron el valor más alto con 51.35 Mg ha⁻¹, seguidos por las categorías (10-15) años con 41.17 Mg ha⁻¹ y (20-35) años, con 33.1 Mg ha⁻¹. A su vez, nuestros resultados en plantaciones de palma de aceite a los (PA5, PA8 y PA18 años) son comparables a los promedios de C en tres especies forestales comerciales (*Tectona grandis* L.f, *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake., *Hevea brasiliensis* Müll. Arg.) establecidas en el estado de Tabasco (López-Reyes *et al.*, 2016; Hernández-Ramos *et al.* 2017; Ruiz-Blandon *et al.*, 2019). Mientras que *Tectona grandis* L.f. a los 6 años en hojas, ramas y fustes almacena en promedio 18.1 Mg C ha⁻¹ (Ruiz-Blando *et al.* 2019). De acuerdo con Hernández-Ramos *et al.* (2017) *Eucalyptus urophylla* S.T. tiene un potencial de captura de C a los 7 años de 32 Mg ha⁻¹. A su vez López-Reyes *et al.* (2016) argumentan que *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. almacena C en tallo, hojas y ramas en promedio a la edad de 5 y 9 años 26.28 y 35.79 Mg ha⁻¹. Mientras que sus resultados a la edad de 25, 32 y 51 reportan valores de 121, 151 y 257 Mg C ha⁻¹ superando en un 50, 60 y 77 % con respecto a las plantaciones maduras (PA18 años) de nuestro estudio. Por su parte Villanueva-López *et al.* (2015) estimaron la biomasa aérea en

un sistema ganadero con cercas vivas de *Gliricidia sepium* en Tacotalpa, Tabasco, reportando valores de 6.5 Mg C ha^{-1} , este resultado está por debajo en un 150 % con respecto a los 23 Mg C ha^{-1} en promedio en plantaciones (PA5 y PA8 años) y en un 400 % menor al valor de 60 Mg C ha^{-1} en plantaciones maduras (PA18 años) en nuestro estudio. Por lo tanto, se puede argumentar que el comportamiento en relación a la captura de C en la biomasa aérea en el agrosistema de palma de aceite, es muy similar al sistema agroforestal cacao, a sistemas forestales y superior a sistemas silvopastoriles en el sureste mexicano. No obstante, para confirmar lo antes mencionado, es recomendable que en futuros trabajos en Tabasco en relación a estos agrosistemas se encuentren en zonas edafoclimáticas similares.

La variabilidad de la dinámica del C en la biomasa aérea y suelo a partir de los resultados de esta investigación, puede explicarse de la siguiente manera:

- 1) La palma de aceite es una planta perenne con producción de racimos de fruto fresco (RFF) durante todo el año, por lo tanto, constantemente incorpora hojas al suelo, aunado a esto, los aportes por material de raíz, al parecer contribuyen al aumento de los almacenes de C en el suelo a través del tiempo.
- 2) El ciclo productivo de las plantaciones en nuestro estudio oscilo (aproximadamente en 18 años), para esta edad, la zona que están entre filas de palmas reciben menos incorporación de materia seca que la zona cerca del estípite y bajo de la fronda (hojas) y, en este sentido, existe un equilibrio diferente de C orgánico del suelo contenido espacialmente en una hectárea de palma de aceite.
- 3) El cambio de uso de suelo antes del establecimiento de plantaciones de palma de aceite: cuando el sitio deriva de pastizales, se observa un aumento de carbono orgánico del suelo (COS); mientras tanto, cuando deriva del bosque secundario, generalmente existe una misma concentración del C orgánico del suelo.
- 4) La biomasa aérea de la palma de aceite aumenta a través del tiempo (aproximadamente en 18 años), llegando a triplicar los valores de C en comparación con los pastizales, mientras tanto, se observan almacenes de C similares al bosque secundario cuando el sistema llega una edad madura.

- 5) Finalmente, la expansión de las plantaciones de palma aceitera en el país debe cumplir con la regulación interna, y debe dirigirse a las tierras anteriormente deforestadas, en particular a los cultivos y pastos degradados, evitando el aumento de la deforestación en las pocas selvas y bosque secundario.

Los resultados de este estudio pueden servir de referencia para poder trabajar en la regulación del uso del suelo y la conversión de áreas boscosas a sistemas agrícolas, pues al cambiar el bosque secundario a palma de aceite y pastizal, la biomasa aérea disminuye en promedio entre el 41 y más del 100 %, en comparación a las áreas con bosque secundario. Es importante considerar que, en futuros trabajos se evalúen las emisiones de los gases de efecto invernadero de estos sistemas para poder comparar y estimar si existe un equilibrio en las emisiones y captura del CO₂ en estos agrosistemas tropicales, para contribuir a mejorar el manejo agrícola que respete al medio ambiente.

Literatura citada

- Aholoukpè, H., Dubos, B., Flori, A., Deleporte, P., Amadji, G., Chotte, J. L., Blavet, D., 2013. Estimating aboveground biomass of oil palm: allometric equations for estimating frond biomass. *Forest Ecology and Management*, 292, 122-129. doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.027.
- Agencia Europea del Medio Ambiente., 2015. El suelo y el cambio climático. Recuperado de <http://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/el-suelo-y-el-cambio-climatico>.
- Batjes, N., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151-163.
- Blandon, B.A.R., Álvarez, E.H., Pérez, E.S., Macías, R.R., Rodríguez, A.G., Velarde, E. V., Hernández, R.S., 2019. Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* Lf en México. *Colombia forestal*, 22, 15-29.
- Corley, R.H.V., Hardon, J.J., Tan, G.Y., 1971. Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica*, 20, 307-315.
- Hartemink, A.E., Bockheim, J.G., 2013, Soil genesis and classification: *Catena*, 104, 251-256.
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Saint-André, L., 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260, 1375-1388. doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.040.
- Hernández-Ramos, J., De los Santos-Posada, H.M., Valdez-Lazalde, J.R., Tamarit-Urias, J.C., Ángel-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., Carrero, O., 2017. Biomasa aérea y Factores de Expansión en Plantaciones Forestales Comerciales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. *Agrociencia*, 51, 921-938.

- Frank, B.M.E., Leizica, E., Peinetti, R., Noellemeyer, E., 2020. Relationships between landscape features, soil properties, and vegetation determine ecological sites in a semiarid savanna of central Argentina. *Journal of Arid Environments*, 173, 104038.
- Fraão, L.A., Paustian K, Pellegrino Cerri, CE, Cerri, C.C., 2013 Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *GCB Bioenergy*, 5, 384–390.
- Fraão, L.A., Paustian, K., Pellegrino., C.C.E., Cerri, C.C., 2014. Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. *Biomass and Bioenergy*, 62, 1-7.
- Fernandes, C.D.A., Matsumoto, S.N., Fernandes, V.S., 2018. Carbon stock in the development of different designs of biodiverse agroforestry systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, 720-725. doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p720-725.
- Khasanah, N.M., van Noordwijk, M., Ningsih, H., Rahayu, S., 2015. Carbon neutral? No change in mineral soil carbon stock under oil palm plantations derived from forest or non-forest in Indonesia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 211, 195-206.
- Leblanc, H., Russo, R., Cueva, J.J., Subía, E., 2006. Fijación de carbono en palma aceitera en la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical*. 2, 143-148.
- López-Reyes, L.Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Zavala-Cruz, J., Gómez-Guerrero, A., Posada-Cruz, S., 2016. Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y bosques*, 22, 49-60.
- Ng, S, K., Thamboo S., de Souza, P., 1968. Nutrient contents of oil palms in Malaya. II. Nutrients in vegetative tissues. *Malaysian Agricultural Journal* 46, 332–90.
- Pulhin, F.B., Lasco, R. D., Urquiola, J.P., 2014. Carbon sequestration potential of oil palm in Bohol, Philippines. *Ecosystems and Development Journal (Philippines)*. 4, 14-19.
- Ramos-Escalante, G., Ley de-Coss, A., Arce-Espino, C., Escobar-España, J.C., Raj-Aryal, D., Pinto-Ruíz, R., Guevara-Hernández, F., Guerra-Medina, G.E., 2018. Ecuaciones

- alométricas para estimar biomasa y carbono en palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en el trópico húmedo de Chiapas, México. *Agrociencia*, 52, 671-683.
- Rahman, N., de Neergaard, A., Magid, J., van de Ven, G.W., Giller, K.E., Bruun, T.B. 2018. Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysian Borneo. *Environmental Research Letters*, 13, 105001.
- Ramos, H.M.N., Vasconcelos, S.S., Kato, O.R., Castellani, D.C., 2018. Above-and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. *Agroforestry Systems*, 1-17.
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabrales, L.D.C., Martínez-Sánchez, J.L., Sánchez-Hernández, R., Valdés-Velarde, E., 2019. Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y bosques*, 25 (1), e2511638. [dx.doi.org/10.21829/myb.2019.2511638](https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638).
- Villanueva-López, G., Martínez-Zurimendi, P., Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Montañez-Escalante, P.I., 2015. Carbon storage in livestock systems with and without live fences of *Gliricidia sepium* in the humid tropics of Mexico. *Agroforestry systems*, 89, 1083-1096.