

**EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN
SOLARES Y VEGETACIÓN NATURAL EN
TZUCACAB, YUCATÁN**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO
PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN MANEJO
DE RECURSOS NATURALES TROPICALES**

POR:

Ingeniero en agronomía

José Alberto Gío Trujillo

Asesores:

Dr. Juan J. Jiménez Osornio

Dr. Héctor Estrada Medina



**POSGRADO INSTITUCIONAL
CIENCIAS AGROPECUARIAS Y MANEJO
DE RECURSOS NATURALES TROPICALES**

Mérida, Yuc., México, Junio de 2019



UADY
UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE YUCATÁN

**COORDINACIÓN GENERAL
DEL SISTEMA DE POSGRADO,
INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN**

POSGRADO INSTITUCIONAL EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y MANEJO DE RECURSOS
NATURALES TROPICALES

**ALUMNO: INGENIERO EN AGRONOMÍA
JOSÉ ALBERTO GIO TRUJILLO**

SÍNODO DEL EXAMEN DE TESIS DE GRADO

**DR. MICHAEL ALLEN
UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA RIVERSIDE**

**DR. JOSÉ RAMOS ZAPATA
CCBA-UADY**

**DRA. PATRICIA MONTAÑEZ ESCALANTE
CCBA-UADY**

**DR. JAVIER SOLORIO SÁNCHEZ
CCBA-UADY**

**DR. LUIS RAMÍREZ Y AVILÉS
CCBA-UADY**

**DR. JOSÉ SALVADOR FLORES GUIDO
CCBA-UADY**

MÉRIDA, YUCATÁN, JUNIO DEL 2019

Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Km. 15.5 carretera a Xmatkuil | Teléfonos: 942 32 00, 02 y 04
Mérida, Yucatán, México | www.uady.mx

“El presente trabajo no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de título o grado diferente o adicional al actual. La tesis es resultado de las investigaciones del autor, excepto donde se indican las fuentes de información consultadas. El tutor otorga su consentimiento a la UADY para la reproducción del documento con el fin del intercambio bibliotecario siempre y cuando se indique la fuente”.

DEDICATORIA

A mis padres (Gustavo Gío Escalante y Bertha Noemí Trujillo Pérez), hermanos (Gustavo Fidel, Cesar Augusto, Bertha del Carmen) y a mi esposa (Gabriela López García) por apoyarme en cada una de las decisiones que he tomado en mi vida.

A mi familia y amigos que me dieron su apoyo para desarrollar satisfactoriamente este grado académico.

A mis tres hijos (Leonardo, Gabriel y Natalia), quienes me han motivado en estos meses difíciles para alcanzar esta meta y las que están por venir en mi vida.

A la señora Miriam del Carmen Trujillo Pérez (q.e.p.d) que me brindo todo su cariño y apoyo en cada una de mis decisiones tomadas y al M.V.Z. Mario Omar Monforte Sandoval (q.e.p.d), al cual considero un maestro importante en mi vida gracias a sus enseñanzas, los recordaré mucho.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores, Dr. Juan José Jiménez Osornio y Dr. Héctor Estrada Medina por todo su apoyo, tiempo y brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de tesis de maestría en la Universidad Autónoma de Yucatán.

A mis tutores, Dra. Patricia Irene Montañez Escalante y Dr. José Alberto Ramos Zapata por su ayuda, consejos y el tiempo que se tomaron a lo largo de todo mi trabajo de tesis de maestría.

Al M. en C. José Luis Cámara Romero por el apoyo brindado en el trabajo en campo y a la M. en C. Mariana López Díaz técnica del laboratorio de Análisis de Suelos-Plantas y Agua (LASPA) de la facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia por su ayuda en los análisis de las muestras de suelo.

A las observaciones realizadas a mi trabajo y el curso-taller “SECUESTRO DE CARBONO, MICORRIZAS Y USO DEL SUELO EN SELVA BAJA CADUCIFOLIA”, impartido por los doctores, Michael F. Allen y Edith B. Allen de la Universidad de California; Riverside, Departamento de biología.

A CONACYT por la beca que se me fue dada durante el desarrollo de la Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales Tropicales de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

A UC MEXUS - CONACYT, por el financiamiento de este trabajo por medio del proyecto “EFFECT OF LAND USE, SOIL TYPE AND AGRICULTURAL PRACTICES ON PRESERVING ORGANIC SOIL CARBON STOCKS” (Clave SISTPROY: FMVZ-2014-0013).

RESUMEN

La problemática actual del cambio climático es causada por la alteración del ciclo de C, debido a la degradación del medio ambiente por las diversas actividades antropogénicas. Una alternativa para combatirlo, es buscar las condiciones adecuadas para el equilibrio en las reservas de C en el suelo considerado el principal sumidero de carbono orgánico de los ecosistemas terrestres. El objetivo del estudio fue evaluar el carbono orgánico del suelo (COS) en solares (huerto familiar) y áreas de un ecosistema del municipio de Tzucacab, Yucatán. En ambos sistemas se tomaron muestras de suelo negro y rojo, a profundidades de 0-10 y 11-20 cm durante dos épocas del año (secas y lluvias). Con el propósito de conocer la dinámica del COS en ambos sistemas y determinar su potencial como sumideros de C. Para determinar el carbono orgánico se utilizó el método de digestión húmeda + colorimetría, en 144 muestras por época de muestreo. Los valores más altos de COS en ambos sistemas se determinaron en condiciones de suelos negros a 0-10 cm de profundidad en la época de lluvia. En selva mediana sub-caducifolia el valor más alto de COS fue de 9.18 g de C kg⁻¹. A su vez, el valor más alto para los huertos familiares fue de 7.95 g de C kg⁻¹. Encontrando diferencias significativas entre sistemas ($P = 0.0100$), suelos ($P = < 0.0001$), profundidades ($P = < 0.0008$) y épocas de muestreos ($P = < 0.0001$). No obstante, las interacciones entre factores no mostraron diferencias significativas ($P = > 0.05$). En conclusión, en este estudio se encontró que el ecosistema tiene mayor capacidad de acumulación de C y las mejores condiciones para fomentar sus reservas en el suelo. Así mismo, aunque los huertos familiares presentaron aproximadamente un 15% menos de C, son agroecosistemas que también pueden ser considerados sumideros de COS.

Palabras clave: Cambio climático; carbono orgánico, huerto familiar, ecosistema.

SUMMARY

The current actual problem of climate change is caused by the alteration of the cycle of C, due to the degradation of the environment by the various anthropogenic activities. Therefore, an alternative to mitigate combat it, is to look for the adequate conditions for the balance in C reserves in the soil and to identify suitable management practices of soil which is considered the main sink of organic carbon of the terrestrial ecosystems. The objective of the study was to evaluate the soil organic carbon (SOC) in homegardens and ecosystem areas in the municipality of Tzucacab, Yucatán. In both systems samples of black and red soil were taken at depths of 0-10 and 11-20 cm during two seasons (dry and rainy). In order to know the dynamics of the SOC in both systems and determine its potential as C sinks. Wet digestion + colorimetry method Walkley & Black (1934) was used to determine the SOC in 144 samples for sampling season. The highest values of COS in both systems were determined in black soils at 0-10 cm depth during the rainy season. The highest SOC value was 9.18 g of C kg⁻¹ in rainforest. In turn, in the homegarden, the highest value was 7.95 g of C kg⁻¹. Finding significant differences in the type of system ($P = 0.0100$), soils ($P = <0.0001$), depths ($P = <0.0008$) and sampling period ($P = <0.0001$). However, the interactions between factors did not show significant differences ($P \Rightarrow 0.05$). In conclusion, ecosystems are systems with greater capacity for accumulation of C in the soil and the best conditions to promote its reserves in the soil. Likewise, although the orchards presented approximately 15% less than C. homegardens are agroecosystems which also can be considered SOC sinks.

Key words: Climate change, organic carbon, homegardens, ecosystem.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
1. Introducción.....	1
2. Revisión de literatura.....	3
2.1. Carbono.....	3
2.1.2. Reservorios de carbono.....	3
2.2. Carbono orgánico del suelo (COS).....	4
2.2.1. Materia orgánica del suelo (MOS) y el CO.....	4
2.2.2. Almacenamiento de CO en el suelo.....	5
2.2.2.1. Unidades de medida para el C.....	5
2.2.3. COS y su importancia en la mitigación del cambio climático....	5
2.3. Índices del COS en México.....	6
2.3.1. Almacenamiento de COS en la península de Yucatán.....	7
2.4. Factores que influyen en el almacenamiento del COS.....	8
2.4.1. Manejo y cambio del uso del suelo.....	8
2.4.2. Estructura de la vegetación.....	9
2.4.3. Estacionalidad climática.....	9
2.4.4. La topografía y ubicación geográfica.....	10
2.5. Carbono orgánico en diferentes suelos.....	10
2.5.1. C en suelos Leptosols (LP).....	11
2.5.2. C en suelos Luvisols (LV).....	12
2.6. Carbono orgánico en Yucatán.....	12
2.7. Fracciones de carbono en el suelo.....	13
2.7.1. Fracción lábil.....	13
2.7.2. Fracción estable.....	13
2.8. Solar (huerto familiar).....	14
2.8.1. Solares como sumideros de carbono.....	15
2.9. Selva mediana sub-caducifolia.....	17

2.9.1. Características.....	17
2.9.1.1. Clima.....	17
2.9.1.2. Suelos.....	18
2.9.1.3. Vegetación.....	18
2.9.2. COS en las selvas tropicales.....	19
2.9.2.1. COS en selvas caducifolias.....	20
2.9.3. COS en vegetación secundaria.....	20
3. Hipótesis.....	22
4. Objetivo general.....	22
4.1 Objetivos específicos.....	22
5. Referencias.....	23
Artículo “El carbono orgánico del suelo en solares y sistemas naturales de Tzucacab, Yucatán”	33

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama del ciclo de C (Fuente: Modificado de Álvarez, 2006)...	3
Figura 2. Principales fuentes de fijación de C en sistemas agro-sistemas (Fuente: Modificado de Brown <i>et al.</i> , 2015).....	16
Figura 3. Dinámica y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (Fuente: Modificado de Ordoñez, 2008).....	19
Figura 4. Localización de los sitios de estudio seleccionados en Tzucacab, Yucatán.....	39

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Descripción de los sistemas evaluados en Tzucacab, Yucatán...	40
Cuadro 2. COS ($g\ de\ c\ kg^{-1}$) en solares (huertos familiares) de Tzucacab, Yucatán.....	43
Cuadro 3. COS ($g\ de\ c\ kg^{-1}$) en áreas de un ecosistema natural de Tzucacab, Yucatán.....	44
Cuadro 4. Comparaciones de Tukey entre grupos evaluados	45

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo 1. ANOVA de COS en sistemas evaluados	60
---	-----------

1. Introducción general

El suelo es considerado el mayor reservorio de carbono orgánico (CO) de los ecosistemas terrestres (1500 Pg de C), almacenado principalmente en forma de materia orgánica, con tres veces más carbono (C) que la litósfera y dos veces más que la atmósfera (Zhang *et al.*, 2007; FAO, 2017).

Uno de los retos que actualmente enfrenta la humanidad es el cambio climático, causado por la alteración del ciclo de C (decremento del C almacenado con respecto al C liberado a la atmósfera), principalmente por la degradación de los ecosistemas por las actividades antropogénicas (cambio de uso del suelo, explotación agropecuaria, etc.) (IPPC, 2007). En México, la alteración del ciclo del C en el suelo es por la pérdida de la cobertura vegetal de los ecosistemas (CONABIO, 2006). Se estima que para el 2011 se han degradado 55.9 millones de ha de ecosistemas, siendo las selvas tropicales las más afectadas (23.4 millones de ha) (INEGI, 2011). Yucatán cuenta con el 0.44 % de afectación en ecosistemas, donde las selvas bajas caducifolias y mediana caducifolia son los tipos de vegetación con mayor fragmentación (Acosta-Lugo *et al.*, 2010).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, *siglas en ingles*), señala que entre los principales ecosistemas con potencial para la fijación de C están las selvas tropicales, ya que juegan un papel clave en los ciclos biogeoquímicos del planeta (FAO, 2017). En México, las selvas tropicales caducifolias representan los ecosistemas de mayor importancia en cuanto a la dinámica de COS al poseer una alta capacidad de regeneración natural después de una perturbación (Luis-Mejía *et al.*, 2007). Es decir, conforme aumenta la etapa de recuperación de un ecosistema perturbado se convierte en un potencial sumidero de C, al registrar que la mayoría del C liberado a la atmósfera se revertirá conforme la etapa sucesional avance (Vaccaro *et al.*, 2003; Campo *et al.*, 2016;). En Yucatán, el manejo de este tipo de vegetación ha jugado un importante papel en los sistemas productivos tradicionales mayas, siendo

crucial los mosaicos de vegetación en diferentes etapas de sucesión ecológica (vegetación secundaria) para la recuperación de un ecosistema (Jiménez-Osornio *et al.*, 2010).

A su vez, los solares (huertos familiares), por la interacción de una alta diversidad de especies vegetales y la producción de hojarasca juegan un papel clave no solo en el ciclaje de nutrientes, también en el balance de C orgánico en el suelo (Benjamín *et al.*, 2001; Montañez *et al.*, 2012). De este modo, el manejo de este sistema tradicional puede pasar de ser una fuente liberadora de CO₂ a la atmósfera a convertirse en un potencial sumidero de C tanto por la acumulación de materia orgánica como por la reestructuración de su cobertura vegetal (Fonseca *et al.*, 2011; Peichl *et al.*, 2012). Existen pocos datos disponibles en Yucatán de COS en estos agro-ecosistemas que nos ayuden a evaluar su importancia en la dinámica de C en el suelo (Montañez *et al.*, 2012), sin embargo, algunos trabajos sugieren que los solares pueden ser considerados sistemas igual de importantes que los naturales como sumideros de C (Benjamín *et al.*, 200).

Es importante monitorear la dinámica del contenido del COS, y considerarla dentro de las alternativas que se propongan para mitigar la problemática del cambio climático (IPPC, 2007). Esto por medio de un equilibrio entre las reservas de COS, tanto en selvas tropicales como en agro-ecosistemas (FAO, 2017). De igual manera es importante determinar las condiciones que favorezcan una mayor retención de las reservas de CO. Todo esto siempre con un enfoque de manejar o gestionar el suelo como un recurso natural que mediante prácticas idóneas nos permita almacenar mayores cantidades de C y que nos permita conocer su dinámica en pérdidas-ganancias dentro de un sistema (Cotler *et al.*, 2016). El objetivo del presente estudio fue determinar el contenido de COS en solares y sistemas naturales del municipio de Tzucacab, Yucatán. Así como la influencia que ejercen los principales factores que regulan su dinámica y la reservas en el suelo como lo es el tipo de sistema, estacionalidad climática (época de seca y lluvia), tipo de suelo (negro y rojo) y su profundidad (0-10 y 10-20cm).

2. Revisión de literatura

2.1. Carbono

El carbono (C) es el cuarto elemento más abundante y esencial en la naturaleza, que junto al nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (Fe), oxígeno (O) e hidrógeno (H) representan las moléculas más importantes para los seres vivos (FAO, 2017). El C constituye el 5% del peso seco de cualquier organismo y es el pilar básico en la formación de carbohidratos, lípidos, proteínas, ácidos nucleicos y sales inorgánicas de cualquier organismo (McVay y Rice, 2006).

2.1.2. Reservorios de carbono

Durante el ciclo de carbono se da un intercambio dinámico entre los principales reservorios, depósitos o almacenes de C (biósfera terrestre, atmósfera, hidrósfera y litósfera) desarrollando un balance constante entre ingresos y pérdidas, principalmente influenciado por procesos químicos, físicos y biológicos como la fotosíntesis, respiración y la descomposición (FAO, 2017; Figura 1). Del mismo modo, la liberación de gases y actividades antrópicas influyen en el balance de dichos reservorios (Burbano-Orjuela, 2018).

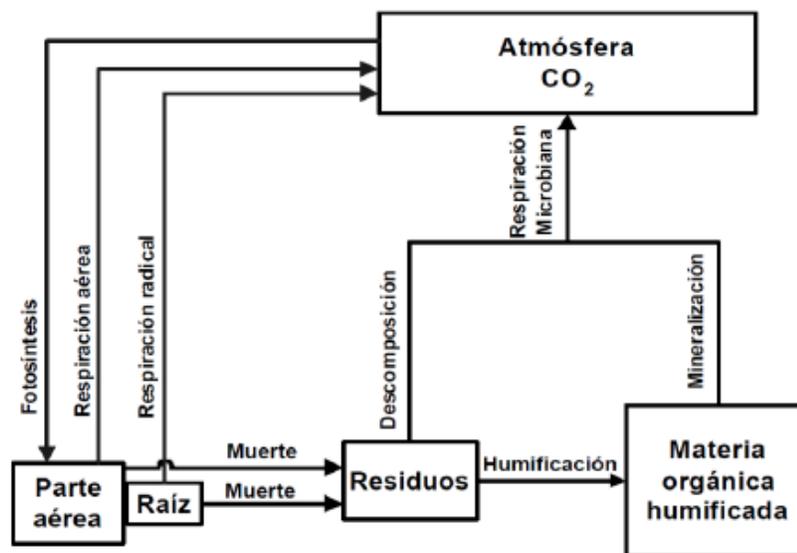


Figura 1. Diagrama del ciclo de C
(Fuente: Modificado de Álvarez, 2006).

En los ecosistemas el carbono se encuentra almacenado en dos formas, una inorgánica y otra orgánica (FAO, 2017). La hidrósfera representa el mayor almacén de carbono inorgánico (CI) con 3,6000 Pg de C (Petagramos de carbono) principalmente en forma de bicarbonato y rocas. A su vez, en el suelo, se encuentra el principal reservorio de carbono orgánico (CO) con aproximadamente 1,500 Pg de C en el primer metro del suelo, seguido de la atmósfera con 750 Pg de C y la litósfera (650 Pg de C) (Jaramillo, 2007).

2.2. Carbono orgánico del suelo (COS)

El COS representa es el 69.8 % del C orgánico de la biósfera terrestre. Es considerado un indicador de la calidad de los suelos minerales, favoreciendo su agregación e influye fuertemente en sus características fisicoquímicas como la estructura, densidad aparente, porosidad, infiltración y capacidad de intercambio catiónico (FAO, 2017). Al igual que interviene en las propiedades biológicas del suelo, actuando como fuente energética (hidratos de carbono) para el metabolismo de la microbiota del suelo como: bacterias, protozoarios y hongos que participan en la descomposición de la materia orgánica y la retención de C (Madigan *et al.*, 2009).

2.2.1. Materia orgánica del suelo (MOS) y el CO

El C es el principal componente de la materia orgánica del suelo (MOS), la cual está compuesta aproximadamente de 55 a 60 % de CO en masa, jugando un papel clave en el ciclo del C, funcionamiento y sustentabilidad de los ecosistemas terrestres (Simpson *et al.*, 2007). El carbono en la MOS es el resultado de la descomposición y el balance dinámico entre la biomasa de plantas vivas (troncos, ramas, hojas de vegetación leñosa y no leñosa), biomasa de plantas muertas, rizósfera (partes subterráneas de las plantas), biomasa animal (animales muertos y excretas) y la biomasa de las comunidades microbianas del suelo (Aguilera, 2000; FAO, 2017).

2.2.2. Almacenamiento de CO en el suelo

La acumulación de CO en el suelo es un evento biológico que se entiende por la capacidad del suelo para retener una determinada cantidad promedio de C para ser liberado de forma gradual en la atmósfera en forma de CO₂ (Pérez, 2005) y se utiliza para detectar los cambios en el carbono en el tiempo, principalmente medido por años (Janzen, 2003).

2.2.2.1. Unidades de medida para el C

La FAO (2017), señala que el C almacenado en el suelo se mide por medio de su intensidad y se expresa en términos por peso por unidad de área: Pg de C ha⁻¹, Mg de C ha⁻¹, g de C kg⁻¹, Kg de C cm⁻², ton de C ha⁻¹, Gt de C ha⁻¹. A su vez, el carbono fijado se refiere al C dentro de un área y se expresa en peso por un determinado tiempo: Pg de C año⁻¹, Mg de C año⁻¹, ton de C año⁻¹ y Gt de C año⁻¹. Los reservorios de carbono se reportan en toneladas de carbono orgánico por hectárea (ton de C ha⁻¹) a una profundidad de suelo de hasta de 30 centímetros. Esta medida también es utilizada como para la subcategoría de vegetación y para un horizonte, capa o barrenado de suelo. Para medir la concentración de COS para una masa de suelo dada obtenida por análisis de laboratorio se utiliza la unidad de gramos por kilo de suelo (g Kg⁻¹) (REED+ Cooperación Sur-Sur; 2015).

2.2.3. COS y su importancia en la mitigación del cambio climático

El papel que juega el almacenamiento de C para la mitigación del cambio climático es mantener un equilibrio dinámico entre las cantidades de CO₂ (dióxido de carbono) que se libera a la atmósfera con el C que se almacena en el suelo (FAO, 2017; Burbano-Orjuela, 2018). La FAO, en 2015, lo declaró el “Año internacional del suelo”, con el propósito de promover la gestión de los suelos para favorecer la fijación de C. Esto como una herramienta importante en la mitigación de cambio climático derivado del mal uso de los suelos (perturbación de los ecosistemas por el cambio de uso del suelo) que aumentan las emisiones de CO₂

a la atmósfera y contribuyen en las pérdidas de C en los ecosistemas terrestres (la biósfera y pedósfera). El manejo de los suelos, mediante prácticas idóneas para fomentar su uso sostenible (v.g. restauración y conservación), es una estrategia para promover las reservas de C en el suelo y evitar así la tasa de incremento del CO₂ a la atmósfera (Burbano-Orjuela, 2018). A esta acción se le denomina secuestro de C, la cual se entiende como el almacenamiento de C en los distintos reservorios tanto en su forma inorgánica como orgánica (FAO, 2017).

Fomentar la fertilidad de los suelos y la restauración de los ecosistemas es el objetivo principal para combatir la problemática del cambio climático, ya que nos permite un mayor secuestro de C en su reserva orgánica mediante la acumulación de materia orgánica y humus derivados de los procesos de descomposición en el suelo de los residuos vegetales y la biomasa (FAO, 2015).

2.3. Índices del COS en México

En México los suelos presentan una gran capacidad de almacenamiento de COS variando desde 0.006 a 16.40% a una profundidad de 0-20 cm, lo que nos señala una gran heterogeneidad de ambientes (Etchevers *et al.*, 2011). Estudios desarrollados a nivel nacional han registrado 13,126 ton de C año⁻¹ en México, el cual representa 0.6 al 0.9 % de reservorio mundial del CO del suelo (Segura-Castruita *et al.*, 2005;). Considerando a los ecosistemas como los manglares, bosques húmedos y secos como sistemas con altos aportes de carbono con un 6.3 a 10.7 % de C. Siendo los ecosistemas forestales los que presentan mayor índice de COS, como lo señala Saynes y colaboradores (2005) al presentar un promedio de 68 mg ha⁻¹ de carbono.

A su vez, los ecosistemas desérticos, pastizales y la vegetación no forestal poseen bajos aporte de COS con 0.4-1.8 %, al registrar la liberación de la mayor parte del C almacenado por las diferentes actividades antropogénicas o presentar características edafo-climáticas poco favorables para la retención de CO en el suelo (Segura-Castruita *et al.*, 2005; Etchevers *et al.*, 2011).

En México la normatividad (NOM-021) que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Esta norma clasifica los suelos agrícolas según los siguientes porcentajes de Carbono orgánico del suelo (NOM-021-SEMANART, 2003):

- De 0.5 % para las clases muy baja.
- De 0.6 a 1.5 % para la clase baja
- De 1.6 a 3.5 % para la clase media.
- De 3.6 a 6.0 % para la clase alta
- Mayor de 6 % para la clase muy alta.

2.3.1. Almacenamiento de COS en la península de Yucatán

Segura-Castruita y colaboradores (2005) determinaron que el sureste de México aporta cerca del 35% del carbono orgánico del suelo ($>80 \text{ Mg de C ha}^{-1}$) en México. Por lo tanto, la península de Yucatán es una región con altos aportes de COS, ya que almacena cerca de $25\text{-}300 \text{ Mg de C ha}^{-1}$, siendo el norte del carso yucateco, carso y lomeríos de Campeche, las regiones de mayor acumulación con cerca del 8-12 % del COS en México (Etchevers *et al.*, 2011).

El estado de Yucatán contribuye con el $206.2 \text{ Mg de C ha}^{-1}$ almacenado en el suelo, es decir un aporte total de 8.41% del carbono orgánico neto registrado en México (Segura-Castruita *et al.*, 2005).

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA, 2014), observó en *Kaxil Kiuic*, reserva biocultural con selva tropical semidecidua en Ozkutzcab, Yucatán, que las reservas de carbono en el suelo presentan alta variación de concentración al registrar entre 5.0 a $115.0 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Este monitoreo se realizó sobre suelos arenosos-arcillosos y su variación en concentración de C está fuertemente relacionada con factores como el grado perturbación del ecosistema y la humedad del suelo (regulada por las precipitaciones).

2.4. Factores que influyen en el almacenamiento del COS

La capacidad de almacenamiento de carbono orgánico en el suelo está principalmente influenciada por las condiciones ambientales, cobertura vegetal, características edáficas y el uso del suelo, los cuales influyen en los cambios de la reserva y distribución del C en el suelo (Guo *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2007; Galicia *et al.*, 2016).

2.4.1. Manejo y cambio del uso del suelo

En Yucatán, la principal causa de los cambios en las reservas del C en el suelo es por el cambio de uso del suelo y perturbaciones en los ecosistemas por actividades de sobrepastoreo y la actividad agrícola, registrando cerca del 30 % de la pérdida de su cobertura vegetal (CONABIO, 2006; INEGI, 2007).

La perturbación de la vegetación y suelo de un ecosistema son considerados los más importantes para explicar las fluctuaciones en el contenido de COS (Hontoria *et al.*, 2004; Galicia *et al.*, 2016). La actividad agrícola es la principal causante de pérdida o liberación de COS a corto plazo, debido a la disminución o eliminación de la materia orgánica, cobertura vegetal y la estructura del suelo, estimando pérdidas de carbono orgánico en el suelo que fluctúan entre 30 y 50% de su nivel inicial (Martínez *et al.*, 2008; FAO, 2017).

Después de la perturbación de un sistema el carbono es liberado a la atmósfera y su contenido en el suelo incrementará a lo largo de las primeras etapas de una sucesión secundaria (Campo *et al.*, 2016). De este modo, el COS liberado a la atmósfera (pérdida de C) se revertirá conforme la etapa sucesional avance, alcanzando los niveles iniciales de C, hasta alcanzar una etapa de sistema maduro (< 50 años) (Vaccaro *et al.*, 2003). Para muchos autores, los valores iniciales de C antes de una perturbación se recuperan después de los 12 a 30 años de descanso, registrando valores topes o alcanzan su máximo valor en ecosistemas mayores a sistemas maduros (Luis-Mejía *et al.*, 2007).

Por lo tanto, la conservación o etapa sucesional de la vegetación de un ecosistema determinará su estructura, composición y cobertura de las especies vegetales, así como el aporte de materia orgánica al suelo y el carbono orgánico del suelo (Walker *et al.*, 2010). Galicia *et al.*, (2016), quienes señalan que la recuperación de los niveles de C ésta fuertemente relacionada con el incremento de la biomasa aérea de los ecosistemas que posteriormente determina un mayor ingreso de residuos orgánicos.

2.4.2. Estructura de la vegetación

Los cambios estructurales de la vegetación es otro factor que nos puede explicar el almacenamiento de carbono en periodos cortos de tiempo, ya que juega un papel importante en el secuestro de CO₂ por parte de su biomasa aérea y la descomposición de su biomasa subterránea (FAO, 2017). Para Luis-Mejía y colaboradores (2007), la tendencia de acumulación de C en el suelo se ve influenciada por la edad de la vegetación, observando cambios negativos (pérdidas de C) en sistemas con una edad menor a 5 años de reforestación.

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) (2014) señala en un monitoreo realizado en Yucatán que la edad de la vegetación es un factor que puede explicar el aumento temporal de las concentraciones de C en el suelo, al registrar una correlación positiva ($R^2=0.65$) del COS al aumentar la edad de los rodales en los sitios estudiados que van desde los 7 a 74 años.

2.4.3. Estacionalidad climática

Para Hontoria *et al.*, (2004), el factor clima, es considerado uno de los factores de control más importantes que determinan los flujos de C orgánico en el suelo y el cambio climático puede reducir la frecuencia de lluvias en las selvas tropicales, modificando las entradas y salidas de C en el suelo (Miles *et al.*, 2006).

La estacionalidad climática puede explicarnos el almacenamiento de carbono en periodos largos en relación con la temperatura/precipitación media

anual (Campo *et al.*, 2016). Durante periodos secos (época de seca) las altas temperaturas reducen el crecimiento de las plantas, el suelo presenta menor humedad, aumenta la tasa de materia orgánica procedente de la vegetación caducifolia y se acelera la descomposición de la MO por la aireación del suelo (Hontoria *et al.*, 2004; FAO, 2017).

La CCA (2014) y Arellano (2017) en Yucatán, señala que el flujo de CO anual registrado en el suelo aumenta cuando se registran mayores precipitaciones. Siendo este el principal factor para un mayor almacenamiento de C en el suelo en selvas tropicales.

No obstante, estudios como el de Dai *et al.*, (2013) afirman que el exceso de humedad en el suelo por tiempos prolongados podría disminuir la concentración de CO en el suelo debido a la prolongada temporalidad de lluvias que saturan el suelo y bajan la tasa de descomposición microbiana de la materia orgánica.

2.4.4. La topografía y ubicación geográfica

Las pendientes y planicies nos permiten una importante distribución de la materia orgánica, ya que, en suelos con pendientes elevadas, la escorrentía puede arrastrar la materia orgánica de la superficie y distribuirla a otras zonas de la misma (Martínez *et al.*, 2008; FAO, 2017). Dixon y colaboradores (1994) señalan que cerca del 37% de COS se encuentra en zonas de latitudes bajas (0-25°), 14% en medias (25-50°) y 49% en altas (50-75°).

2.5. Carbono orgánico en diferentes suelos

En México se registra una gran diversidad edáfica, ya que posee 25 de los 32 grupos de suelos propuestos por la Base Referencial del Recurso del Suelo (WRB, 2015), de los cuales sólo seis (Leptosols, Regosols, Feozems, Calcisols, Luvisols y Vertisols) representan los grupos de suelos de mayor distribución, ocupando en conjunto el 81.7% del territorio nacional (INEGI, 2011).

La información sobre el potencial de secuestro de C de suelos está principalmente asociada a las características físicas, químicas y biológicas de los suelos (Martínez *et al.*, 2008; Galicia *et al.*, 2016). La coloración del suelo está asociada a atributos relevantes como contenido de humus, presencia de ciertos minerales, potencialidad y productividad del suelo, relacionándose principalmente con la MO, fertilidad y características fisicoquímicas como la retención de humedad, pedregosidad, textura, pH, etc. (INEGI, 2011; FAO, 2017).

Los suelos con mayor capacidad y almacenamiento de COS en México corresponden a suelos orgánicos de tonalidad oscura (negro) como los pertenecientes a los grupos de los suelos Leptosols, Gleysols, Nitisols y Andosols que presentan niveles de entre 5.6 a 8% de COS, en gran parte por sus altos niveles de materia orgánica e influenciada por su disponibilidad de agua (Bautista *et al.*, 2005).

Los suelos arcillosos (rojizos) como los Luvisols y Vertisols poseen niveles medios de COS con un 5-6 % (Etchevers *et al.* 2011). Los bajos niveles de concentración de carbono los encontramos en suelos del tipo calcáreo y de acumulación de caliza como Solonetz, Calcisols, Gipsisols y Planosols con aproximadamente 0.6 a 1.8% (Bautista *et al.*, 2005; Etchevers *et al.* 2011).

2.5.1. C en suelos Leptosols (LP)

Los suelos con tonalidad oscura (Leptosols) estarán relacionados con niveles altos de C, al poseer características de suelos delgados que se localizan sobre roca dura que sobreyace la roca calcárea (más de 40 % de CaCO_3), pedregosidad, profundidad menor de 25 cm, suelo poroso, con buenos niveles de humedad (buen drenaje), altos aportes de materia orgánica que incrementan el almacenamiento de C en el suelo al estabilizar una mayor cantidad de sustancias húmicas (Estrada-Medina *et al.*, 2013). Estos tipos de suelos (Leptosoles húmicos), en Yucatán pueden tener una capacidad de almacenar hasta 160 veces más peso en C orgánico (Bautista y Palacio, 2005; INEGI, 2007; Bautista, 2010;).

2.5.2. C en suelos Luvisols (LV)

Por otro lado, los suelos de coloración rojiza, presentan niveles medios de almacenamiento de C, al relacionarse a las partes bajas de los relieves, baja o nula pedregosidad, profundidad variada (25-100 cm) aportes de materia orgánica de entre el 5%, pH ácido, presencia de óxidos de Fe³⁺, compactación (baja porosidad), problemas de alta humedad que reducen la descomposición de la materia orgánica y disminuyen la actividad microbiana (Bautista y Palacio, 2005; INEGI, 2007; Bautista, 2010; Estrada-Medina *et al.*, 2013).

2.6. Carbono orgánico en Yucatán

En Yucatán varios autores reportan las diferencias entre el contenido de COS y el tipo de suelo. Reportando en suelos rojos como el *Kankab* con valores mínimos y máximos de 1.15 a 11.9 % de CO (Shang y Tiessen, 2003; Sweetwood *et al.*, 2009), el *Chac lu'um*, con 7 a 9 % (Bautista *et al.*, 2005), en suelos oscuros como (*Box lu'um*) 5 a 25.2 % (Shang y Tiessen, 2003, Sweetwood *et al.*, 2009; Bautista *et al.*, 2005) y el *Hay lu'um* con 7.4 % (Díaz-Garrido *et al.*, 2005),

Moya-García y colaboradores (2003) en la comunidad de Xohuayán, Yucatán, realizaron un estudio sobre el manejo de los suelos mediante agricultura tradicional y encontraron que un mayor almacenamiento de CO se presenta en suelos negros (*Box'luum*), en suelos agrícolas y con Roza-Tumba-Quema (RTQ).

Así mismo, Águila-Alcántara (2007) reportó mayores contenidos de CO en suelos negros en agro-ecosistemas como los huertos familiares y vegetación secundaria, observando un 3.5 % de COS en suelos negros y 2.1 % en suelos rojos en huertos familiares, al igual que un 6.4 % para suelos negros y 3.5 % en suelos rojos en vegetación secundaria.

A su vez, Delgado-Carranza *et al.* (2017) reportan en suelos Leptosols un mayor porcentaje de CO en suelos negros y grises oscuros (*Tzekel/Chich lu'um*)

que en suelos pardos (*Hay lu'um/Chaltun*). Estos valores están dentro del rango de valores medios según la NOM-021-SEMARNAT (2003). La variación del COS en los suelos de Yucatán se debe a su diversidad y heterogeneidad, así como a sus características físico-químicas tales como: la densidad aparente y el contenido de MO.

2.7. Fracciones de carbono en el suelo

Los flujos del COS se ven influenciado por un balance dinámico entre la absorción y la pérdida por descomposición de la MO. Por lo tanto, la mayoría del C se almacena en su forma lábil y una más estable. A su vez, la minoría del C que se almacena se encuentra en un extracto inferior a 10 cm (FAO, 2017).

2.7.1. Fracción lábil

La mayor parte del COS (99%) es lábil (se mineraliza rápidamente) y es más activa, puesto que se encuentra acumulado en la materia orgánica de la capa superficial del suelo e influenciada por la actividad microbiana principalmente entre los primeros 15 cm del suelo (FAO; 2017). En la fracción lábil del COS se encuentra disponible la fuente energética (hidratos de carbono, ligninas, taninos, proteínas, ácidos grasos) necesaria para el metabolismo de la micro y macrobiodiversidad del suelo, influenciada por la cantidad y acumulación de materia orgánica (FAO, 2017; Burbano-Orjuela, 2018).

2.7.2. Fracción estable

La forma más estable del COS se presenta solo en una pequeña fracción (1%) acumulada en forma de compuestos húmicos (húmicos, ácidos húmicos y fúlvicos), la cual ingresa ($55 \text{ Pg de C año}^{-1}$) y acumula en la fracción húmica estable (0.4 Pg/año), encontrando la respuesta más fuerte de reserva de COS en los primeros 20-30 cm, disminuyendo ligeramente según aumente la profundidad, siendo esta fracción estable más resistente a la mineralizada en conjunto a una menor tasa de liberación de CO_2 a la atmósfera (FAO, 2017; Burbano-Orjuela,

2018). En este estrato del suelo, las reservas de C se origina de raíces de árboles y restos vegetales subterráneos (Martínez *et al.*, 2008).

2.8. Solar (huerto familiar)

En Yucatán un sistema tradicional bien conocido es el huerto familiar, también conocido como solar o traspatio, el cual es un sistema agroforestal (Montañez *et al.*, 2012). En este agroecosistema se interrelacionan aspectos sociales, culturales, económicos, tecnológicos y ecológicos (Altieri, 2002).

Los solares son agroecosistemas de origen prehispánico resultado de la relación entre los ecosistemas tropicales (selvas tropicales) y los diversos grupos étnicos que los manejan (Montañez-Escalante *et al.*, 2012). Los solares se caracterizan por el manejo tradicional, enfocado en el manejo integral de recursos naturales con base a los saberes locales por algún integrante de la unidad familiar, estableciéndose en la misma casa-habitación de la familia e integrando una gran diversidad de especies arbóreas, arbustivas, herbáceas y hortalizas de uso múltiple relacionados con animales domésticos (Mariaca *et al.*, 2010).

El huerto familiar como unidad dinámica posee una importante relevancia social, económica y biológica en la región, de manera que pueden contribuir tanto en la economía familiar, seguridad y soberanía alimentaria, como al intercambio social para la preservación cultural y por la alta diversidad de especies manejadas pueden representar un potencial banco de conservación de la biodiversidad o reservorio genético de especies útiles características de las selvas tropicales de la región (Jiménez-Osornio *et al.*, 2003; Montañez-Escalante *et al.*, 2012).

Los huertos familiares se consideran uno de los agro-ecosistemas más antiguos de uso y manejo de los suelos (Kumar y Nair, 2004). Toledo *et al.*, (2008) señala que, en Yucatán, las comunidades mayas con una estrategia de uso múltiple integrada por unidades de paisajes, prácticas agrícolas, apícolas,

ganaderas, agroforestales, de caza, recolección y extracción, alcanzan un enfoque sustentable para aprovechar la flora-fauna, relieves y diversos tipos de suelos.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2012) señala que los huertos familiares, ofrecen una serie de servicios para mejorar tanto la calidad para la familia, la sociedad y el medio ambiente. Uno de los aspectos importantes de los huertos familiares ofrece son los servicios ambientales que estos proporcionan al ecosistema.

Los servicios que los huertos familiares proveen como unidad en sí, según la base de criterios de la clasificación cuádruple de la *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio 2001* (MEA, 2005; Krishnamurthy *et al.*, 2017) se dividen en (Cano y Moreno 2012; Cano, 2015):

- Provisión: Productos obtenidos del sistema y la agro-diversidad (interacción flora silvestre, productiva y ornamental).
- Regulación: Servicios de regulación del clima, control de erosión del suelo y la reducción a la susceptibilidad a los desastres naturales.
- Culturales: Conservación de flora y fauna silvestre por las redes sociales, herencia espiritual y conocimiento tradicional.
- Soporte o apoyo: Control de plagas, fotosíntesis, captura de carbono, ciclaje de nutrientes, polinización, dinámica de suelos, manejo de vegetación (flora silvestre endémica como árboles, arbustos y herbáceas) y el manejo de animales domésticos (perros, gatos, etc.) y productivos (ganado bovino, caprino y aves de corral).

2.8.1. Solares como sumideros de carbono

Por su alta biodiversidad en especies leñosas los huertos familiares son considerados como un importante sumidero de carbono al asemejar en estructura, composición y asociación de especies útiles a una selva madura local (selva tropical) de los cuales muy a menudo estos sistemas son colindantes o proceden

de alguna vegetación (selva tropical) tanto perennifolia como caducifolia (Mariaca *et al.*, 2010; Montañez-Escalante *et al.*, 2014; Jiménez-Osornio *et al.*, 2015).

La riqueza de los huertos familiares aporta carbono al suelo y hay algunos autores que proponen que su contribución al COS puede ser mayor al de la vegetación secundaria del ecosistema de la bioregión (Kumar 2006; Saha *et al.*, 2009; Nair *et al.*, 1999).

Para Montañez *et al.*, (2014), los huertos familiares (solares) en Yucatán presentan una importante relevancia ecológica, al observar una tasa alta de ciclaje de nutrientes dentro del sistema y fertilidad de sus suelos, al reincorporar al suelo los nutrientes por medio de las excretas de los animales domésticos que generalmente están dispersos en el área. Del mismo modo, la vegetación principalmente de especies leñosas, que normalmente componen este tipo de agroecosistema son fijadores de C orgánico en el suelo, que contribuyen en el stock de C en el suelo (Figura 2).

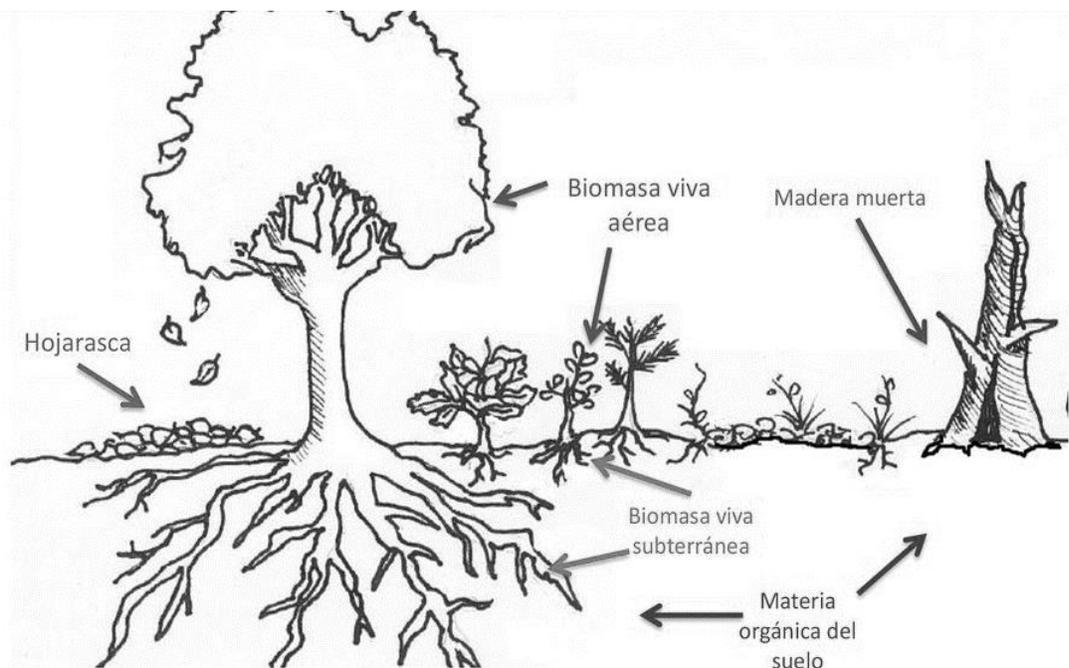


Figura 2. Principales fuentes de fijación de C en sistemas agro-sistemas
(Fuente: Modificado de Brown *et al.*, 2015).

Varios estudios corroboran estos aportes de C en el almacenamiento de COS en este tipo de sistemas. Morón-Ríos y Alayón-Gamboa, (2014), señalan a la producción e incorporación de material orgánico (biomasa aérea) al suelo como la hojarasca y la biomasa subterránea como de las principales fuentes y medio de fijación de COS en los huertos familiares en la península de Yucatán.

Benjamín y colaboradores (2001) reportan el importante papel que juega la hojarasca en el ciclaje de nutrientes y el balance de C orgánico en el suelo. Así mismo, reportan en huertos familiares de Yucatán que la mayor producción de hojarasca se da entre las principales especies arbóreas que conforman este tipo de agroecosistema de las cuales *Melicoccus bijugatus* (Huaya) y *Spondia purpurea* (Ciruela), contribuyen con cerca de 47 kg ha⁻¹ de C. Este C se incorpora al suelo y a lo largo de la extensión del solar, por medio de las quemadas localizadas que se efectúan como parte de sus labores cotidianas de limpieza.

2.9. Selva Mediana subcaducifolia (SMSC)

La península de Yucatán es reconocida por ser una región de gran diversidad de ambientes y rica en vegetación (Durán y García, 2010). La mayor parte de su vegetación está compuesta de selvas tropicales variando de acuerdo con las zonas geográficas, su altura, fisonomía y estructura (CICY, 2010). La selva caducifolia también conocida como bosque tropical caducifolio por Rzedowski, (1986), es la vegetación con más distribución del estado de Yucatán, siendo la selva Mediana subcaducifolia (SMSC) la más representativa con el 8.58 % de extensión territorial (desde la parte nororiental hasta la suroeste), ocupando una extensión de 336,338.05 Km² (CICY, 2010; Flores-Guido *et al.*, 2010).

2.9.1. Características

2.9.1.1. Clima

Este tipo de vegetación presente un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. Presentan una época de lluvias con 1,208-1,220 mm anuales y época

seca que puede extenderse hasta 7-8 meses. Se registra una temperatura media anual de 25.9 -26.6 °C (Flores-Guido *et al.*, 2010).

2.9.1.2. Suelos

La selva mediana caducifolia no posee un determinado tipo de suelo (Rzedowski, 1986). No obstante, en Yucatán los suelos en este tipo de vegetación son considerados someros (poco profundos) y pedregosos, con una significativa presencia de materia orgánica acumulada en el suelo con en los primeros 10 cm (Zamora-Cresencio *et al.*, 2009; Flores-Guido *et al.*, 2010).

2.9.1.3. Vegetación

La SMC se caracteriza por una proporción de 25 al 75 % de árboles que pierden su follaje durante la época de seca (Zamora-Cresencio *et al.*, 2009). Este tipo de vegetación presenta un estrato arbóreo con una altura que oscila entre los 10 a 15 metros (Flores-Guido *et al.*, 2010).

La selva mediana subcaducifolia está constituida de especies de leguminosas, gramíneas y árboles nativos como (Zamora-Cresencio *et al.*, 2009; CICY, 2010).

- *Acacia gaumeri* (Catzin), *Acacia pennatuala* (K'ank iilsché), *Caesalpinia gaumeri* (Kitam che), *Leucaena leucocephala* (Huaxim), *Gymnopodium floribundun* (Dzidzilché), *Caesalpinia yucatanensis* (Taak'in ché), *Cordia dodencandra* (K'opte), *Brosimum alicastrum* (O'ox), *Bursera simaruba* (Chacah), *Manilkara zapota* (Chak Ya), *Piscidia piscipula* (Ja'bin), *Enterolobium cyclocarpum* (Pich'); *Gliricidia maculata* (Sak ya'ab), *Simarouba glaoca* (Pa'sak), *Guazama umbilifolia* (Pixoy), *Cedrela odoraba* (Cedro), *Vitex gaumeri* (Ya ax'nik), *Sabal mexicana* (Guano), *Sabal yapa* (Guano), *Ceiba petandra* (Ceiba), *Annona reticulata* (Anona), *Bucida buceras* (Pucté), entre otras de porte alto y mediano.

2.9.2. COS en las selvas tropicales

En México, las selvas tropicales son consideradas sistemas con alto potencial de almacenamiento de C tanto en su biomasa área (vegetación) como en el suelo, jugando un papel importante en los flujos y almacenes de carbono (Jaramillo, 2004; Segura-Castruita *et al.*, 2005).

El C en el suelo es considerado el principal reservorio de C en este tipo de ecosistemas, convirtiéndolos en sumideros de carbono de importancia primaria, ya que almacenan cerca del 40% del total del carbono en México, (Ordoñez *et al.*, 2008; Vega, 2008).

El COS en selvas tropicales se almacena en altos niveles en la parte superficial del suelo (10 cm) por la acumulación de residuos orgánicos reincorporados al ciclo por la descomposición del follaje, ramas, raíces, troncos, desechos y productos (Figura 3) (McVay y Rice, 2006; Ordoñez, 2008).

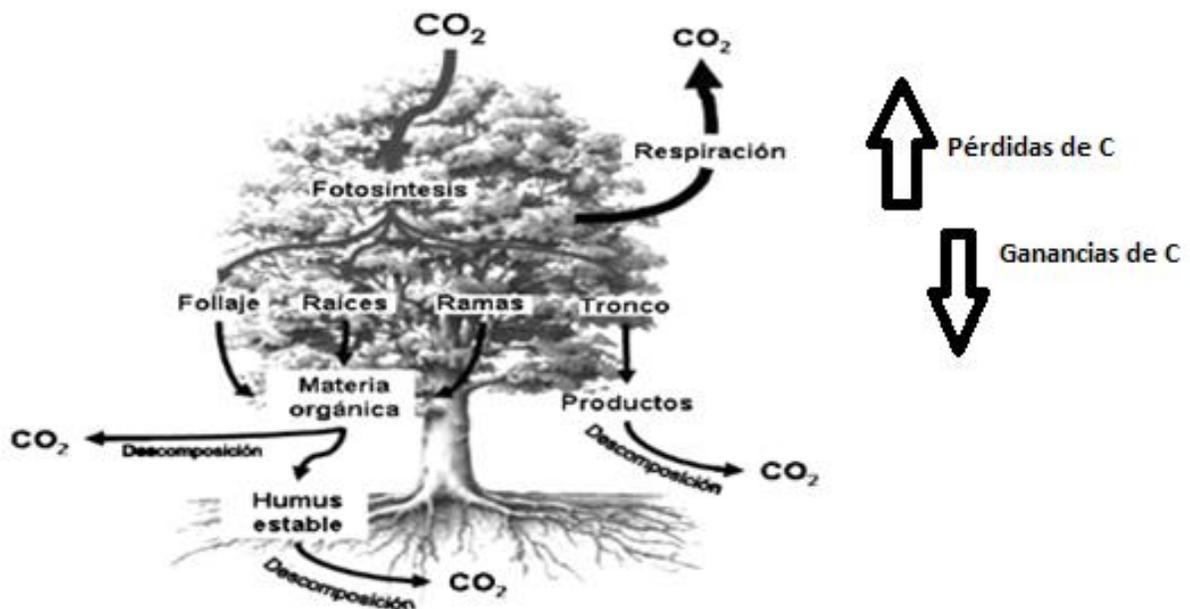


Figura 3. Dinámica y almacenes de carbono en un ecosistema forestal
(Fuente: Modificado de Ordoñez, 2008).

Las selvas tropicales contribuyen respectivamente con el 22.91 % (69.6 Mg de C ha⁻¹) y 23.07 % (110.5 Mg de C ha⁻¹) del contenido de COS promedio de las regiones ecológicas mayores de México (Segura-Castruita *et al.*, 2005).

2.9.2.1. COS en selvas caducifolias

En general, las selvas tropicales caducifolias y sub-caducifolias representan entre el 10 y el 15 % de reservorio de COS en México con 95 Mg de C ha⁻¹ en selva subcaducifolia y 70 Mg de C ha⁻¹ en selvas caducifolias, ambos considerados niveles medios de C (INEGI, 2007).

La vegetación caducifolia en México juega un importante papel en el ciclo del carbono participando con el 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo, tanto por la biomasa área de las plantas (fotosíntesis) como en la acumulación en el suelo (Jaramillo, 2004; Ordoñez, 2008).

En inventarios de C recabados en México sobre las reservas de C en selvas tropicales, las selvas caducifolias presentan mayores reservas (Mg de C ha⁻¹) en el suelo que en su parte aérea. Esta importancia según los autores radica en la tasa de producción de materia orgánica propia de este tipo de vegetación, clave en el ciclaje de nutrientes y acumulación de C en el suelo (Kauffman *et al.*, 2013).

Flores-Guido *et al.*, (2010), señalan que en Yucatán en zonas de la sierra de Ticul y depresiones de terreno (rejolladas y hondonadas) de la selva mediana sub-caducifolia se registran mayores acumulaciones de materia orgánica.

2.9.3. COS en vegetación secundaria

Los mosaicos de vegetación en diferentes etapas de sucesión secundaria derivadas de las selvas tropicales, son un componente importante en la diversidad de vegetación de Yucatán (Flores-Guido *et al.*, 2010).

La vegetación secundaria se origina de los diversos cambios en la cobertura vegetal de las comunidades naturales por perturbaciones naturales o antropogénicas, como la agricultura migratoria y ganadería (Jiménez-Osornio *et al.*, 2010; López-Jiménez *et al.*, 2018). La selva mediana sub-caducifolia con vegetación secundaria representa el 16.53 % de la extensión territorial de Yucatán con 649,191.16 Km² (Durán y García, 2010).

Después de un disturbio los niveles de carbono cambian en magnitud a medida que el ecosistema atraviesa por diferentes etapas de crecimiento (edad sucesional del sistema) por el crecimiento de las especies leñosas y la acumulación de la materia orgánica en el suelo, convirtiéndose de una fuente de CO₂ liberado a la atmósfera en un sumidero de carbono (Fonseca *et al.*, 2011; Peichl *et al.*, 2012). Como lo menciona López-Jiménez *et al.*, (2018), en un estudio realizado en Tizimín, Yucatán, en el área de conservación “El zapotal”, el cual señalan que la sucesión secundaria y la resiliencia de un ecosistema perturbado depende de su capacidad como sumidero de C en el suelo. Estos autores afirman que un ecosistema perturbado en sus primeras etapas de regeneración biológica se inicia la recuperación de las reservas de COS al aumentar la captura de CO₂ de la atmósfera, al momento que las especies leñosas crecen y se desarrollan dentro del sistema.

Los aportes de COS, después de una perturbación por actividad humana, se le atribuyen principalmente a la incorporación de los residuos en los primeros centímetros del perfil suelo (0-10 cm) y al elevado número de raíces (<2 cm de diámetro) que se encuentran en este mismo estrato del suelo y que revierten de este modo las pérdidas o liberación a la atmósfera del carbono por alguna perturbación (Finér *et al.*, 2011; Campo *et al.*, 2016).

3. Hipótesis

- Los solares en Yucatán son sumideros de C en el suelo, al presentar características similares a ecosistemas naturales, por lo que se esperan contenidos de COS similares a los ecosistemas de la bioregión, encontrándose un mayor contenido en la parte superficial de los suelos negros (0-10 cm) y durante la época de lluvia.

4. Objetivo general

- Evaluar el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en solares y ecosistemas naturales en dos tipos de suelos, a dos profundidades y en dos épocas del año en Tzucacab, Yucatán.

4.1 Objetivos particulares

- Determinar el contenido de carbono orgánico del suelo en dos diferentes sistemas de manejo (solares y ecosistemas naturales).
- Cuantificar el carbono orgánico del suelo en los dos sistemas evaluados, en sus dos tipos de suelo (negro y rojo), a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) y durante dos épocas del año muestreo (secas y lluvias).
- Comparar el contenido de carbono orgánico del suelo entre los dos sistemas evaluados (solares y ecosistemas naturales).

5. Referencias

Acosta-Lugo, E; Alonso-Parra, D; Andrade-Hernández, M; Castillo-Tasad, D; Cháble-Santos, J; Durán, R; Espadas-Manrique, C; Fernández-Stonhaslova, I; Fraga, J; Galicia, E; Gonzales-Iturbe, J.A; Herrera-Silveira, J; Sosa-Escalante, J; Villalobos-Zapata, G.J. y Tun-Dzul, S. 2010. Plan de conservación de los Pétenes-Celestun-Palmar. Universidad Autónoma de Campeche. PRONATURA península de Yucatán. 177 p.

Águila-Alcántara, E. 2007. Soil fertility in calcareous tropical soils from Yucatan, Mexico, and Villa Clara, Cuba, affected by land use and soil moisture effects. Göttingen, Cuvillier Verlag, 147 p.

Aguilera, S. 2000. Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. pp 77-85.

Altieri, M. 2002 Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrarios sustentables. En: Sarandon S. J. (ed) Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable. Ediciones Científicas Americanas. Buenos Aires-La Plata, Argentina. pp 27-34.

Álvarez, R. 2006. Balance de carbono en los suelos. Información técnica de trigo campaña 2006. Publicación miscelánea N. 105. INTA. pp 36-43.

Arellano, F. 2017. Flujo de CO₂ del suelo en una selva mediana subcaducifolia en Yucatán, México. Centro de Investigación Científica en Yucatán (CICY) A.C. tesis para otorgar el grado de Maestría en Ciencias: Recursos Naturales. 133 p.

Bautista, F. 2010. El suelo. En: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Durán R. y M. Méndez (Eds) CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. pp 14-16.

Bautista F; Diaz S; Castillo M; Zinck J. 2005 Spatial heterogeneity of the soil cover in the Yucatan Karst: Comparison of Mayan, WRB, and numerical classifications. Eurasian Soil Science (38): S81-S88.

Bautista, F. y Palacio, G. 2005. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, UADY, SEMARNAT, INECOL. 281 p.

Benjamín, T; Montañez, P; Jiménez, J. and Gillespie, A. 2001. Carbon, water and nutrient flux in Mayan homegardens in the Yucatan Peninsula of Mexico. *Agroforestry Systems* 53: 103-111.

Burbano-Orjuela, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96.

Brown, S; Murray, L y Casanm, F. 2015 Estimación de los factores de emisión de los cambios de la cubierta vegetal: Deforestación y degradación de los bosques. Wageningen ur; gofc gold; forest carbon. 74 p.

Campo, J; García-Oliva, F; Navarrete Segueda, A. y Siebe, C. 2016. Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Terra Latinoamericana*. Vol-34 (1): 31-37.

Cano, E 2015. Huertos familiares, un camino hacia la soberanía alimentaria. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*. Vol. 10 (20). pp 70-91.

Cano, E y Moreno, V. 2012. Consideraciones finales. En Mariaca, R. (ed.). El huerto familiar del sureste de México. México, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco/ECOSUR. pp 522-535.

Casanova, L; Caamal M; Petit, A; Solorio, S; y Castillo C. 2010 Acumulación de biomasa en *Leucaena leucucefala* y *Guazama ulmifolia* asociadas en monocultivo. *Revista Forestal Venezolana* 54 (1): 45-50.

Comisión para la Cooperación Ambiental. 2014. Evaluación de la dinámica del carbono en el bosque tropical semideciduo de la península de Yucatán, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 48 p.

CICY. 2010 Flora de la península de Yucatán. Vegetación. Herbario CICY, Unidad de Recursos Naturales. <http://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/vegetacion.html>. (Consultado el 10. 01. 15).

CONABIO. 2006. Capital natural y Bienestar Social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad. México, DF. 70 p.

Cotler, H; Martínez, M. y Etchevers, J. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34: 125-138.

Dai, Z.; Trettin, C; Li, G; Sun, D; Amatya, D and Li, H. 2013. Modeling the impacts of climate variability and hurricane on carbon sequestration in a coastal forested wetland in South Carolina”, *Natural Science* (5): 375-388.

Delgado-Carranza, C; Bautista, F; Calvo-Irabién, L; Aguilar-Duarte, y. Martínez-Tellez, J. 2017. El carbono orgánico en Leptosols con distribución discontinua en la península de Yucatán. Vol 4 (10): 31-38.

Díaz-Garrido S; Bautista F; Delgado C; Castillo, M. 2005. Mapas parcelarios de suelo en Mérida, Yucatán, México. En: Bautista F, Palacio G (eds). Caracterización y manejo de suelos en la península de Yucatán, México. UAC, UADY, INE, México. pp 45-158.

Dixon, R; Brown, K; Houghton, R; Solomon, A; Trexler, M; and Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* (263):185-190.

Durán, R. y García, G. 2010. Distribución espacial de la vegetación. En: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Durán R. y M. Méndez (Eds). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. pp. 131-135.

Estrada-Medina, H; Bautista, F; Jiménez-Osornio, J; González-Iturbe, J. y Aguilar Cordero, W. 2013. Maya and WRB Soil Classification in Yucatan, Mexico: Differences and Similarities. *Soil Science*. pp10.

Etchevers, J; De Jong, B; Paz, F; Saynes, V; Hidalgo, C; Cruz, C; Carrasco, M. y Padilla, J. 2011. Carbono y sector agropecuario. Seminario Hacia REDD++: Integración de Políticas Forestales y Agropecuarias UAEM, Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. pp 64.

FAO. 2012. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Roma. p 198.

FAO. 2015. Los suelos ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático. Los suelos juegan un papel clave en el ciclo del carbono. Roma. p 4.

FAO. 2017. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil report. Rome. p 58. <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGL/agll/globdir/index.htm>. (Consultado el 15.01.19).

Finér, L; Ohashi, M; Noguchi, K. and Hirano, Y. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *For. Ecol. Manag.* 262: 2008–2023.

Fonseca, W; Rey Benayas, J. and Alice, F. 2011. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *For. Ecol. Manag.* 262: 1400–1408.

Flores-Guido, J; Durán García, R y Ortiz-Díaz, J. 2010. Comunidades vegetales terrestres. En: *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. Durán R. y M. Méndez (Eds). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. pp. 125-129.

Galicia, L; Gamboa, A. M; Silke, C; Chávez, B; Vergara, V; Ramírez, P; Saynes, V y Siebe, C. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29

Guo, Y; Amundson, R; Gong, P and Yu, Q. 2006, Quantity and spatial variability of soil carbon in the conterminous United States: *Soil Science of American Journal*, (70): 590–600.

Hontoria, C; Rodríguez-Murrillo, J. y Saa, A. 2004. Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España peninsular. *Edafología*, Vol. 11(2):149-157.

INEGI. 2007. Sistema Nacional de Información sobre Perfiles de Suelo. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> (Consultado el 05.01.15)

INEGI. 2011. Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Serie V. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> (Consultado el 05.01.15)

IPCC. 2007. Cambio Climático, Informe de síntesis. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. pp 94. 35.

Janzen, H. 2003. Agricultural soils: their place in the global carbon cycle. In: soil organic carbon and agriculture: developing indicators for policy analyses. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Cooperation and Development. Smith, S. (Ed.). Paris, France. pp. 11-20.

Jaramillo, V. 2004. El ciclo global del Carbono. Cambio climático: una visión desde México. INE/SEMARNAT. México, D.F. pp. 16–27.

Jaramillo, V. 2007. Ciclo global del Carbono. Instituto Nacional de Ecología. UNAM. [///C:/Users/Alberto%20Gio/Desktop/Instituto%20Nacional%20de%20Ecolog%C3%ADa.htm](http://C:/Users/Alberto%20Gio/Desktop/Instituto%20Nacional%20de%20Ecolog%C3%ADa.htm). (Consultado el 10.02.16).

Jiménez-Osornio, J; Ruenes-Morales, M. y Ake Gómez, A. 2003. Mayan home gardens L sites for *in situ* conservation of agricultural diversity. In: Seed Systems and Crop Genetic Diversity On-Farm. Proceedings of a Workshop. D. Jarvis, R. Sevilla-Panizo, J. Chavez-Servia, and T. Hodkin (eds). IPGRI. (Vol. 1620): 9-15.

Jiménez-Osornio, J; Zarco Salgado, M. Lendechy Grajales, A. y Becerril García, J. 2015. Los solares: Una oportunidad para contribuir a la seguridad alimentaria, mitigación y cambio climáticos en Yucatán. En: Canto, R. y Zarco, M. (Eds). *Extensión y Responsabilidad Social: Los proyectos sociales en comunidades de*

aprendizaje implementados en la UADY. pp. 237-264.

Jiménez-Osornio, J., Durán García, R., Dupuy Rada, J. y González-Iturbe, J. (2010). Uso del suelo y vegetación secundaria. En: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Durán R. y M. Méndez (Eds). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 460-464 pp.

Kauffman, J; Donato, D; y Adame, M (2013). Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de Trabajo 117. Bogor, Indonesia: CIFOR. 48 p.

Krishnamurthy, L.; Krishnamurthy, I; Rajagopal y Peralta, A. Solares. (2017). Agricultura familiar para el desarrollo rural incluyente. Terra Latinoamericana 35: 135-147 pp.

Kumar, B. M. 2006. Carbon sequestration potential of tropical homegardens. A timetested example of sustainable Agroforestry. Springer, The Netherlands. pp.185-204 pp.

Kumar, B. and Nair, P. 2004. The enigma of tropical homegardens. Agrofor. Syst. 61: 135-15.

López-Jiménez, L; Durán-García, R y Dupuy-Rada, J. 2018. Recuperación de la estructura, diversidad y composición en una selva mediana sub-perennifolia en Yucatán, México. Rev. Madera y Bosques. Volumen 25 (1): pp. 1-17.

Luis-Mejía, S; Gómez-Guerrero, A; Etchevers-Barra, J; Ángeles-Pérez, G; López-López, M. y Horwath, W. 2007. Acumulación de carbono orgánico en el suelo en reforestaciones de *Pinnus michoacana*. Agrociencia, vol. 41(7):711-721.

Madigan, T; Martinko, M; Dunlap, V. and Clark, P. D. 2009. Biología de los microorganismos .España: Pearson Educación, S. A. 200 pp.

Mariaca, R; González, A. y Arias, L. 2010. El huerto maya yucateco en el siglo

XVI. ECOSUR, CINVESTAV-Mérida, UIM-QRoo, CONACYT. p 180.

Martínez, H; Fuentes, E; y Acevedo, H. 2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencia Agronómica. Departamento de producción Agrícola. Vol. 8: 68-96.

McVay, K; y Rice, C. 2006. The organic carbon of soil and global carbon cycle. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. Department of agronomy. Carbon series. 4 p.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press. Washington, DC, USA.

Miles, L; Newton, R; Defries, S; Ravilouis, I; May, S. Blyth, V. Kapos and J. E. Gordon. 2006. A global overview or the conservation status of tropical dry forest. *Journal of Biogeography*. 33 (3): 491-505.

Montañez-Escalante, P; Ruenes-Morales M; Jiménez-Osornio, J; Chimal-Chan, P. y López Burgos, L. 2012. Los Huertos Familiares o Solares en Yucatán. En: *El Huerto Familiar en el Sureste de México*. Mariaca M. (Editor). SENARPAM, Tabasco, ECOSUR, México. pp 131-147..

Montañez-Escalante, P; Ruenes-Morales, M; Ferrer-Ortega, M. y Estrada-Medina, H. 2014. Los huertos familiares Maya–Yucatecos: situación actual y perspectivas en México. *Rev. Ambienta. España*. Vol. (107): p. 10.

Morón-Ríos, A. y Alayón-Gamboa. J. A. 2014. Degradación de la hojarasca y aporte de nutrimentos al suelo en los huertos familiares. En: Alayón-Gamboa, J. A. y Morón-Ríos, A. *El huerto familiar: Un sistema socioecológico y biocultural para sustentar los modos de vida campesinos en Calakmul, México*. ECOSUR. p. 192.

Moya-García, X; Caamal, A; Ku, B., Chan, E., Armendáriz, I., Flores, J., Moquel, J., Noh, M., Rosales, M. y Xool, J. 2003. La agricultura campesina de los mayas en Yucatán. *Leisa. Rev. Agroecología*. Ocho estudios de caso. pp. 7-17.

Nair, P; Buresh, R; Mugendi, D; and Latt, R. 1999. Nutrient Cycling in Tropical Agroforestry Systems: Myths and Science. In: Buck, L., Lassoie, PL. and Fernandes, E.C.M. (Eds.) Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems. crc Press, Boca Raton, Florida, USA. p. 44.

Ordóñez, D. 2008. Emisiones y captura de carbono derivadas de La dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la región purépecha. Tesis doctoral. Instituto de Ecología. UNAM. p 140.

Ordoñez, J., De Jong, B., García-Oliva, F., Aviña, F., Pérez, J., Guerrero, G., Martínez, R. and O. Maser 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the central highlands of Michoacán, México. *Forest ecology and management*, (255): 2074–2084.

Pérez, E. 2005. Potencial de plantación y fijación de carbono. MAG FOR–PROFOR. Tomo 2: p.165.

Peichl, M., Leava, N. A., and Kiely, G. 2012. Above-and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. *Plant Soil* 350: 281–296.

REED+ Cooperatción Sur-Sur 2015. Protocolo. Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México. Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México; Fomento de la cooperación Sur-Sur; Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP). p. 136.

Rzedowski, J. 1986. Vegetación en México. Limusa, Noriega Editores. 3er Edición. México, D.F. p. 403.

Saha, S; Nair, R; Nair, V. and Kumur, M. 2009. Soil carbon stock in relation to plant diversity of homegardens in Kerala, India. *Agroforest System*. 76:53–65 pp.

Saynes, V; C. Hidalgo, J; Etchevers, D; and Campo, J. (2005). Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *App. Soil Ecol.* 29: 282-289.

Segura-Castruita, M; Sánchez-Guzmán A; Ortiz-Solorio, P y Gutiérrez-Castorena, C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México *Terra Latinoamericana*, Universidad Autónoma Chapingo, México. Vol. 23 (1): 21-28 pp.

SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003. p. 85.

Shang C; and Tiessen H. 2003 Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biogeochemistry* 62: 177-196.

Simpson, A; Song, G; Smith, E; Lam, B; Novotny, E. and Hayes, M. 2007. Unraveling the Structural components of soil humin by use of solution-state nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.* (41), 876-883.

Singh, S; Singh, A; Sharma, B; and Tarafdar, J. 2007, Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India: *Journal of Arid Environments* (68): 408–421.

Sweetwood R; Terry R; Beach T; Dahlin B. and Hixson D. 2009 The Maya footprint: Soil resources of Chunchucmil, Yucatán, Mexico. *Soil Science Society of American Journal* 73: pp 1209-1220.

Toledo, M; Barrera, N; García, F; y Alarcón, P. 2008. Uso múltiple y biodiversidad entre los mayas yucatecos (México). *Interciencia* 33: 345-352

Vaccaro, S; Arturi, M; Goya, J; Frangi, J. y Piccolo, G. 2003. Almacenaje de Carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*, 28 (9): 521-527.

Vega, L. 2008. Importancia económica de las Áreas Naturales Protegidas como sumideros de Carbono en México. *The Nature Conservancy*, p.7.

Walker, L.; Wardle, D; Bardgett, R; and Clarkson, B. 2010. The use of hrono sequences in studies of ecological succession and soil de development. *Journal of Ecology* 98: 725-736.

Walkley, A. and Black. I. A. 1934. An Examination of Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Sci.* pp.37:29-37.

WRB. 2015. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106.* FAO. Rome.

Zamora-Cresencio P; Flores Guido, J; y Ruenes-Morales, R. 2009. Flora útil y su manejo en el cono sur del estado de Yucatán, México. *Polibotánica* (28): 227-250.

Zhang, H; Lou, Y; Wong, M; Zhao, Q. and Zhang, G. 2007. Soil Organic Carbon storage and change whit reduction in agricultural activities in Hong Kong. *Geoderma* (139):412-419.

El artículo “**El carbono orgánico del suelo en solares y sistemas naturales en Tzucacab, Yucatán**” se encuentra con el formato para la revista *AGROCIENCIA*, editada por el Colegio de Posgraduados, revista dentro del índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica del CONACYT.

**EL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN SOLARES Y SISTEMAS
NATURALES EN TZUCACAB, YUCATÁN**

José Alberto **Gío-Trujillo**¹, Juan **Jiménez-Osornio**¹ y Héctor **Estrada-Medina**¹.

¹ Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Carretera Mérida-Xmatkuil Km 15.5. E-mail: albertogio88@hotmail.com; josornio@uady.mx; hector.estrada@uady.mx. Teléfono 9423112.

RESUMEN

En la actualidad el principal problema ambiental del planeta es el cambio climático, que surge por la alteración en el ciclo de C, el cual entendemos como el desequilibrio en las reservas de C almacenado con respecto al C liberado a la atmósfera. En el presente estudio se evaluó el carbono orgánico del suelo (COS) en huertos familiares y selva mediana subcaducifolia (SMSC) en el municipio de Tzucacab, Yucatán, con el propósito de determinar la dinámica del COS en dos sistemas distinto manejo. Se cuantificó el COS en dos tipos de suelos (negros y rojos) a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm), cada uno durante dos épocas (seca y lluvia). El contenido de carbono orgánico se determinó por el método de digestión húmeda + colorimetría en un total de 288 muestras por época de muestreo. Los suelos negros en el estrato superficial (0-10 cm de profundidad) durante la época de lluvia presentaron las mejores condiciones para la fijación de COS. El valor más alto de COS se observó en SMSC con 9.18 g de C kg⁻¹ mientras que en los huertos familiares el valor más alto fue de 7.95 g de C kg⁻¹. Se encontraron diferencias estadísticas en el tipo de sistema ($P = 0.0100$), suelos ($P = < 0.0001$), profundidades ($P = < 0.0008$) y época de muestreo ($P = < 0.0001$). Sin embargo, las interacciones entre factores no fueron estadísticamente diferentes ($P = > 0.05$). En conclusión, la SMSC es el sistema con mayor capacidad de acumulación de COS en suelos negros a profundidades de 0-10 cm en la época de lluvia.

Palabras clave: Cambio climático, carbono orgánico, huerto familiar, selva mediana subcaducifolia.

INTRODUCCIÓN

Durante el ciclo de C se desarrolla un intercambio dinámico entre sus principales reservorios (atmósfera, hidrósfera y litósfera) mediante un equilibrio constante entre ingresos y pérdidas (almacenamiento y liberación de C) (FAO, 2017; Burbano-Orjuela, 2018). El mayor reservorio terrestre de carbono en su forma orgánica (CO) se encuentra en el suelo (pedósfera) con aproximadamente 1,500 Pg de C en sus primeros metros de profundidad (Jaramillo, 2007; FAO, 2017).

Para el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2007), en contexto del principal problema ambiental del planeta conocido como el cambio climático, el carbono orgánico del suelo (COS) presenta una particular importancia al ser considerado potencial sumidero de C. La disminución o eliminación de la materia orgánica y la perturbación de los suelos (remoción de la cobertura vegetal) son las principales causas de la pérdida de carbono orgánico de los ecosistemas terrestres, las cuales causan un decremento en la cantidad de C almacenado con respecto al C liberado a la atmósfera (FAO, 2017).

Por lo tanto el manejo de los suelos es una importante actividad para la recuperación de un ecosistema (natural o productivos) y la recuperación de las reservas de C del suelo (Jiménez-Osornio *et al.*, 2010).

En México, los ecosistemas naturales como la vegetación caducifolia y sub-caducifolia juegan un importante papel en el ciclo del C participando con el 90 % del flujo

anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Jaramillo, 2004; Segura-Castruita *et al.*, 2005; Ordoñez *et al.*, 2008).

A su vez, los sistemas tradicionales de producción, como los huertos familiares (solares) pueden ser considerados prometedores sumideros de C, al pasar de una fuente de CO₂ liberado a la atmósfera a convertirse en un sistema con la capacidad de almacenar C en el suelo por la acumulación de materia orgánica por la reestructuración de su cobertura vegetal (Benjamín *et al.*, 2001; Montañez-Escalante *et al.*, 2014; Jiménez-Osornio *et al.*, 2015). Sin embargo, pocos estudios se han realizado para evaluarla dinámica del COS en este tipo de sistemas.

En presente estudio se evaluó el contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en solares y un ecosistema natural (selva mediana sub-caducifolia) del municipio de Tzucacab, Yucatán, bajo condiciones de dos tipos de suelo (negro y rojo), dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) y dos épocas de muestreo (secas y lluvia). Con el propósito de conocer su dinámica, monitorear las condiciones que favorezcan su almacenamiento y el manejo idóneo de este recurso natural para garantizar una mayor retención de COS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El trabajo se realizó en el municipio de Tzucacab, Yucatán localizado entre las coordenadas 19° 38' y 20° 09' N y 88° 59' y 89° 14' O; con una superficie total de 77,200 ha, organizada en 18 comisarías (INEGI, 2011).

El municipio de Tzucacab presenta un clima cálido-subhúmedo, con lluvias en verano (AWo'), un rango de temperatura de 24-28°C y una precipitación media anual de 1000-1200 mm (Zamora-Crescencio *et al.* 2009).

Su topografía varía desde relieves planos, lomeríos suaves hasta lomeríos elevados con 150 msnm (Zamora-Crescencio *et al.* 2009). El tipo de vegetación predominante es de selva mediana sub-caducifolia (78.36%) (Flores-Guido *et al.*, 2010).

Los suelos dominantes según la clasificación de la WRB (2014) son el Luvisols (64.11%), Vertisols (20.18%), Phaeozems (12.69%) y Leptosols (1.56%) (INEGI, 2011). Para el estudio se seleccionaron doce sitios (6 solares y 6 de vegetación natural) localizados en cinco comisarias en Tzucacab, Yucatán (Figura 4).

Los sitios de estudio se seleccionaron con base en la presencia de suelos de coloración oscura o *box lu'um* (negros) y rojizos o *Kankab* (rojos), dentro de los mismos sistemas (Estrada-Medina *et al.*, 2013). Los suelos negros y rojos respectivamente son

característicos de los suelos de la orden Leptosol (LP) y Luvisol (LV) según la Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo (WRB, 2015).

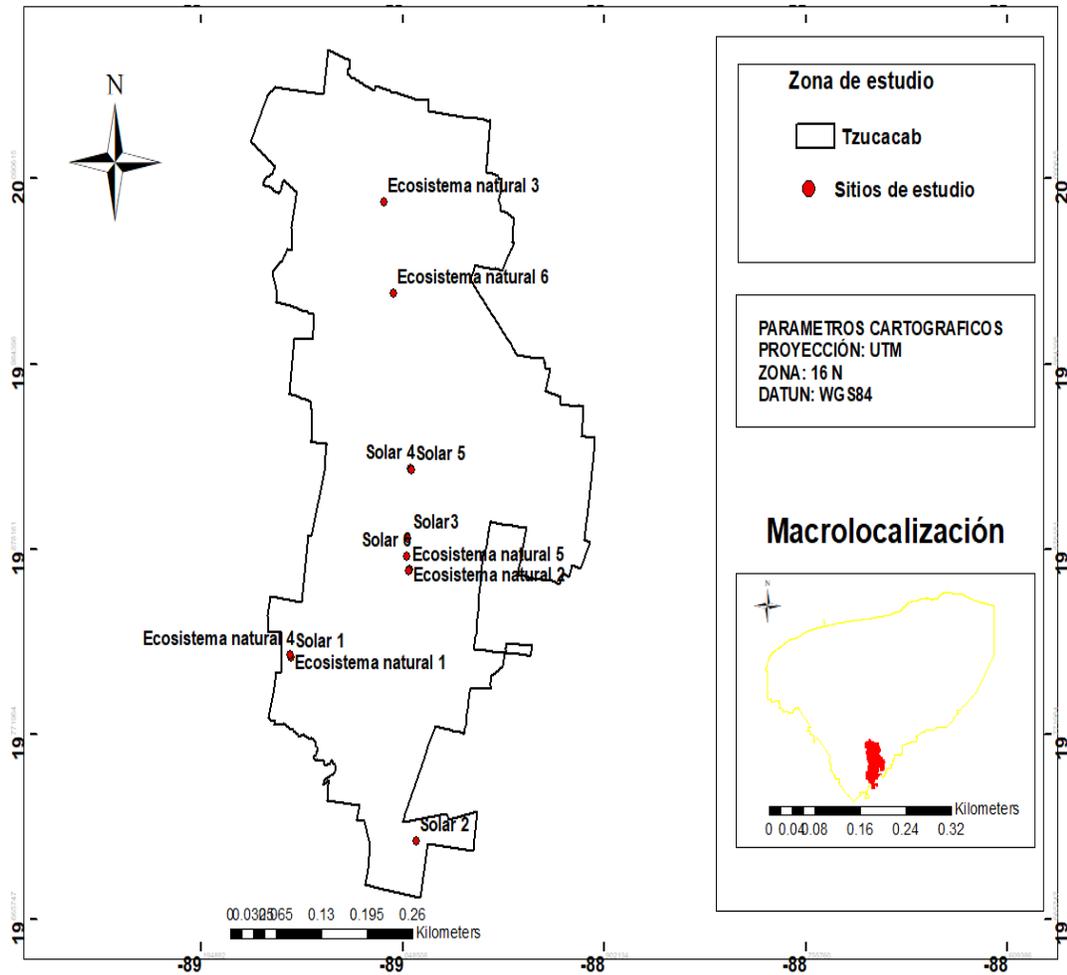


Figura 4. Localización de los sitios de estudio seleccionados en Tzucacab, Yucatán.

En cuanto a las características de los sitios de estudio se determinaron de acuerdo al tipo de manejo del sistema (agro-ecosistemas y selva tropical) y sus características biológicas mediante inspección visual en el cual se registró el tipo de vegetación presente en el sitio, presencia de animales, manejo del suelo, etc. (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los sistemas evaluados en Tzucacab, Yucatán.

Tipo de sistema	Descripción de los sitios de estudio
<p>Agro-ecosistema (Solar o huerto familiar)</p>	<p>Enfoque del sistema: Productivo (cultivos traspatio de hortalizas pequeñas y frutales).</p> <p>Manejo: Quemadas localizadas periódicamente (por semana), limpieza manual; Sin fertilización agronómica, riego casero, sin uso de abonos orgánicos.</p> <p>Suelos: Principalmente suelos rojos (<i>Kan kab</i>) con parches de negros (<i>Boox lum</i>).</p> <p>Vegetación: Conformado de plantas ornamentales, frutales y árboles de porte alto de interés forestal. Los sistemas son colindantes con parches de vegetación de SMSC [¶], de los cuales son derivados (> 10 años desde su conversión) ^{¶¶}.</p> <p>Fauna: Presencia de fauna doméstica (perros, gatos, aves de corral, cerdos, etc.).</p>
<p>Ecosistema (selva tropical)</p>	<p>Tipo de vegetación: Ecosistema natural del tipo de vegetación de SMSC [¶].</p> <p>Manejo: Manejo de conservación y protección bajo el pago de servicios ambientales hidrológicos apoyado por el PRONAFOR. (los sistemas protegidos presentan una antigüedad > 80 años) ^{¶¶}. Los parches de vegetación de SMSC presentan un rango > 20 años y son derivados de la agricultura y aprovechamiento de madera.</p> <p>Suelos: Principalmente están compuestos de suelos rojos (<i>Kan kab</i>), negros (<i>Boox lum</i>) y parches de suelos grises inundables (<i>Akalché</i>).</p> <p>Fauna: No se registró presencia o vestigios de fauna en el área.</p>

[¶] Selva mediana sub-caducifolia.

^{¶¶} La determinación de la antigüedad del sistema desde su última perturbación se realizó por medio de entrevistas a los propietarios y/o pobladores.

Diseño del estudio

Para determinar la influencia de las variables independientes (tipo de suelo, profundidad y época de muestreo) sobre las variables de respuesta, (la concentración de C en el suelo) en ambos sistemas, se realizó un diseño con arreglo factorial aleatorio de tres factores (2x2x2).

El estudio consistió en un diseño factorial aleatoria, divididos en 12 sitios (6 solares y 6 sitios de selva). Se tuvieron 3 factores con dos niveles o efectos fijos cada uno: tipo de suelo (negro y rojo), profundidad (0-10 y 10-20 cm) y época (secas y lluvias).

Muestreo de suelos

Se realizó un muestreo estratificado aleatorio (Bautista *et al.*, 2005) en cada tipo de suelo (negro y rojo). El muestreo consistió en coleccionar tres muestras por tipo de suelo (1 kg) a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm), es decir un total de 12 muestras por cada sitio de estudio (3 muestras por suelo x 2 profundidades x 2 tipos de suelo = 12 muestras).

La colecta de las muestras se realizó en dos periodos:

- Secas (enero-mayo de 2015)
- Lluvias (septiembre-octubre de 2015).

Se coleccionaron un total de 144 muestras por cada período de muestreo (12 muestras por sitio de estudio x 12 sitios de estudio = 144 muestras totales). Las muestras se secaron al aire libre y fueron tamizadas por medio de un tamiz de malla de 2 mm para posteriormente realizar los análisis.

Análisis del carbono orgánico del suelo (COS)

Para la determinación del carbono orgánico total (COT) se utilizó el método de digestión húmeda (oxidación del C) propuesto por Walkley y Black en 1934 (Fassbender, 1980), empleando $K_2Cr_2O_7$ y H_2SO_4 de Hycl[®], como mezcla oxidante. Con esta metodología se puede detectar entre el 70-84 % del carbón orgánico total, utilizando un factor de corrección se puede estimar el total de contenido total de C. En México se recomienda utilizar el factor 1.298.

El contenido de carbono orgánico en el suelo se determinó por el método de colorimetría (Anderson e Ingram, 1993; Okalebo *et al.* 1993), empleando un espectrofotómetro UV-Visible, THERMO SCIENTIFIC, modelo GENESYS™ 10S.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza para un diseño con arreglo factorial de 3 factores (2x2x2), para determinar si los factores a evaluar interactúan entre sí o estudiar cómo el efecto de un factor cambia por los niveles de los otros factores. Las diferencias estadísticas entre las medias de los valores de los factores estudiados (tipo de suelo, profundidad y época de muestreo) se determinaron por medio de una prueba HSD de Tukey ($P \leq 0.05$).

El software estadístico utilizado para cada uno de los análisis fueron InfoStat/L versión 2018 para Windows 7 (FCA-UNC; Argentina).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COS en solares (huertos familiares) y ecosistemas naturales

Los valores más altos de COS tanto en solares (huertos familiares) como en los ecosistemas naturales (selva mediana sub-caducifolia) se encontraron en los suelos negros a profundidad de 0-10 cm durante la época de lluvia. Por lo contrario, los contenidos de COS más bajos se presentaron en suelos de coloración rojiza a 10-20 cm de profundidad en época de seca (Cuadro 2 y 3).

Cuadro 2. COS (g de C kg^{-1}) en solares (huertos familiares) de Tzucacab, Yucatán [¶].

Tipo de manejo	Tipo de suelo	Época de Muestreo	Profundidad (cm)	Carbono orgánico (g de C kg^{-1})	
(Huerto casero)	Solar	Seca	10-20	3.02	
		Rojito	Seca	0-10	3.33
			Lluvia	10-20	4.17
		Lluvia	0-10	4.89	
	Negro	Seca	10-20	5.07	
		Seca	0-10	5.98	
			Lluvia	10-20	7.08
		Lluvia	0-10	7.95	

[¶] Los datos se presentan de menor a mayor concentración de COS

Cuadro 3. COS ($g\ de\ c\ kg^{-1}$) en áreas de selva mediana sub-caducifolia de Tzucacab, Yucatán[¶].

Tipo de manejo	Tipo de suelo	Época de Muestreo	Profundidad (cm)	Carbono orgánico (g de C kg^{-1})
Ecosistema Natural (Selva mediana Sub-caducifolia)	Rojo	Seca	10-20	3.19
		Seca	0-10	3.78
		Lluvia	10-20	4.46
		Lluvia	0-10	4.75
	Negro	Seca	10-20	5.85
		Seca	0-10	7.65
		Lluvia	10-20	7.84
		Lluvia	0-10	9.18

[¶] Los datos se presentan de menor a mayor concentración de COS

Entre factores, el tipo de sistema ($P = 0.0100$), suelos ($P = < 0.0001$), profundidades ($P = < 0.0008$) y época de muestreo ($P = < 0.0001$) presentaron diferencias significativas (Anexo 1; Cuadro 4). No obstante, por grupo (época, profundidad y tipo de suelo) y sus diferentes niveles nos permiten explicar los cambios en las reservas de C y la influencia que ejercen en el suelo. A su vez, ninguna de las interacciones entre los factores, ya sea dobles (suelo-profundidad, suelo-época y profundidad-época) o la interacción triple (suelo-profundidad-época) en ambos sistemas evaluados mostraron diferencias significativas ($P = > 0.05$) (Anexo 1) Es decir, que la combinación de los niveles de los factores estudiados no

fueron diferentes entre sí y el resultado de COS no varió estadísticamente. La falta de diferencias estadísticas entre interacciones dobles y triples de los factores evaluados en el estudio nos señala que los factores no se relacionan entre sí y sus características físicas y biológicas no pueden determinar en conjunto las concentraciones de CO en el suelo.

Cuadro 4. Comparación de Tukey entre los grupos evaluados

Factor	Medias	n	E.E.
Tipo de sistema			
Solar	5.19	144	0.18 A
Vegetación natural	5.84	144	0.18 B
Época de muestreo			
Seca	4.74	144	0.18 A
Lluvia	6.29	144	0.18 B
Profundidad de muestreo (cm)			
10-20	5.34	144	0.18 A
0-10	6.34	144	0.18 B
Tipo de suelo			
Rojo	5.09	144	0.18 A
Negro	5.94	144	0.18 B

Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $P \leq 0.05$) entre los factores época, profundidad y suelo. [¶]Error estándar.

De este modo, la falta de diferencias en el CO de los sitios estudios en sus interacciones concuerda con varios autores quienes afirman que los flujos en las reservas de C y su distribución en el suelo están directamente influenciada por numerosos factores como las características edáficas, condiciones ambientales, cambio uso del suelo y

cobertura vegetal, que independientemente ejercen efectos sobre la acumulación de C en el suelo (Hontaria *et al.*, 2004; Singh *et al.*, 2007; Galicia *et al.*, 2016; FAO, 2017).

Las diferencias estadísticas encontradas entre tipo de sistemas nos indican que las implicaciones de manejo y las características físicas-biológicas influyen en las reservas de C en suelo y sus flujos dentro del mismo sistema.

La selva mediana sub-caducifolia (SMSC) presentó el valor más alto de COS con 9.18 g de C kg⁻¹. Estos valores indican que la selva mediana sub-caducifolia en comparación al agoeosistema evaluado es el que presenta la mayor capacidad de almacenar C edáfico. Estos resultados están fuertemente ligados a las implicaciones por manejo del sistema y sus características biológicas, ya que los sitios de estudio de selva mediana sub-caducifolia registran un manejo por conservación (no se observan perturbaciones por actividades agropecuaria o el aprovechamiento de madera) y presentan características de un sistema forestal maduro (su grado de conservación varía desde parches > 20 años hasta los > 80 años de antigüedad). Siendo la estructura de la vegetación una característica clave que nos pueda explicar los cambios en los flujos y la concentración en las reservas de C en el suelo en el estudio. El tipo de vegetación sub-caducifolia es clave en el papel en las reservas de C en el suelo, ya que la presencia de la materia orgánica en el suelo característico de este tipo de vegetación y la topografía de la región, que conjunta desde elevaciones suaves (lomeríos) hasta pronunciadas, van acumulando mayores cantidades de material orgánico que nos permiten mayores concentraciones de C en el suelo (Flores-Guido *et al.*, 2010; Kauffman *et al.*, 2013).

Con valores de carbono orgánico en el suelo de 3.02 a 7.95 g de C kg⁻¹, los huertos familiares en Tzucacab, Yucatán, presentan una gran capacidad para almacenar COS. Esto puede deberse a la similitud de estos sistemas con las selvas tropicales, con las que a menudo colindan, y al manejo tradicional que favorece la incorporación de materia orgánica, el almacenamiento de C en su parte superficial, y mejora la calidad de suelo, contribuyendo así a mantener un equilibrio en las reservas de C edáfico (Montañez-Escalante *et al.*, 2014). Las características de manejo de los huertos familiares seleccionados en este estudio fomentan las reservas de C en el suelo y la distribución de los flujos de C por toda el área que conforma el sitio. Mediante la interacción de animales domésticos que por medio de sus excretas contribuyen con la fertilidad de los suelos en todo el sistema y las quemas localizadas en el área que permite que la hojarasca producida por el sistema (principalmente especies leñosas) ingrese al suelo como C en las cenizas (Mariaca *et al.*, 2010; Montañez-Escalante *et al.*, 2014; Jiménez-Osornio *et al.*, 2015). Por lo tanto, estos sistemas pueden ser considerados potenciales sumideros de C al igual que un ecosistema natural. Así mismo, Águila-Alcántara (2007) registró que en huertos familiares de Yucatán, valores similares de C (g de C Kg⁻¹) en suelos negros y mayores niveles en suelos rojos con respecto a una vegetación secundaria de diferentes y un ecosistema maduro (mayor a 60 años).

A través de estos tipos de sistemas tradicionales se puede fomentar el almacenamiento de COS mediante prácticas tradicionales de conservación y manejo de los suelos característicos en este tipo de agro-ecosistema. Como lo mencionan varios autores, (Lal, 2004; Delgado *et al.*, 2013; Altieri *et al.*, 2015 y Cotler *et al.*, 2016) quienes afirman que las prácticas de conservación de los suelos en los sistemas tradicionales, son una

estrategia viable que puede mitigar el cambio climático actual al mantener la calidad de los suelos, contribuir a la recuperación de los ecosistemas y, finalmente, aumentar el secuestro de CO₂ y las reservas de C en el suelo.

Las diferencias estadísticas entre el tipo de suelo y la profundidad de muestreo encontrado en los sistemas evaluados (huertos familiares y selva mediana sub-caducifolia) se relacionan principalmente a las características orgánicas de los suelos oscuros y la materia orgánica presente en las primeras capas del suelo (primeros 10 cm). En el estudio se determinó que los suelos negros a 10 cm mostraron los contenidos más altos de COT, al estar en mayor contacto con el proceso de descomposición por parte de la biota edáfica y poseer una mayor cantidad de sustancias húmicas (ácido húmico y fúlvico). Por lo tanto, se registra un mayor almacenamiento de C en el suelo y ciclaje de nutrientes en este tipo de suelo y estrato de muestreo en el estudio (Haile *et al.*, 2010).

Estos resultados concuerdan con estudios realizados por Etchevers *et al.*, (2011) en México y Bautista *et al.*, (2005) en Yucatán, los cuales señalan a los suelos oscuros, Leptosols (LP), como de mayor capacidad y fijación de C en suelo por sus características físicas (textura, profundidad, pedregosidad, etc.), altos niveles de materia orgánica y presencia de sustancias húmicas. En estudios realizados en suelos de la península de Yucatán varios son los autores que reportan similitudes con los resultados de este estudio, al registrar un mayor contenido de C orgánico en suelos negros característicos del *Box lu'um* en comparación al *Kan'kab* (suelos rojizos) sin importar el tipo de manejo de los sistemas (Bautista *et al.*, (2005). Moya-García y colaboradores (2003) señalaron la misma tendencia de mayor contenido de COS en suelos negros sobre suelos rojos en

agroecosistemas de distintos manejos (RTQ, cañada, sin quema y mecanizado) y Águila-Alcántara, (2007) al evaluar el COS en tres sistemas diferentes (huertos familiares, vegetación secundaria y selvas maduras).

Los suelos rojos a 10-20 cm de profundidad en ambas épocas de muestreo (seca y lluvia) presentaron los contenidos más bajos de COS en el estudio tanto en huertos familiares como en selva mediana sub-caducifolia. Esto puede estar fuertemente ligado a los aportes, interacción y oxidación de la materia orgánica (MO) en estos tipos de suelos, al identificar la tendencia de disminución del carbono orgánico conforme aumenta la profundidad de muestreo. Estos resultados son similares a Sweetwood *et al.* (2009) y Shang y Tiessen (2003) quienes determinaron que la materia orgánica de los suelos negros es la clave para fomentar un mayor secuestro de C en suelo en comparación a los suelos rojos. Ya que, a mayor tasa de materia orgánica presente en el suelo, mayor la descomposición y transformación de los compuestos orgánicos en C.

Numerosos son los estudios que concuerdan con el comportamiento en los flujos del C en el suelo de este estudio relacionados al tipo de suelo y profundidad de muestreo. Matus y Maire, (2000) y Sánchez-Hernández *et al.*, (2011) identificaron resultados similares al señalar que la acumulación y aportes de MO ésta relacionado con la textura de los suelos (granulometría).

Estos autores afirman que los suelos arcillosos (< 0.002), característica de los suelos rojos, presentan menores tasas de acumulación de C en el suelo, debido a la textura porosa que impide la oxigenación y mineralización de la materia orgánica. Es decir, el grado de la

saturación del C ésta estrechamente relacionada con las texturas finas del suelo como la arcillosa y limo. Dichos autores concuerdan con el estudio, al determinar que los suelos negros, principalmente de textura franca, presentan la textura ideal (equilibrio entre textura arena-limo-arcilla) para una mayor mineralización de la materia orgánica y mejor drenaje del agua que permite mayor respiración del suelo y acumulación de C.

Con respecto a la menor concentración de CO observada en el estudio en la capa más profunda del suelo (11-20 cm). Autores como Liu *et al.*, (2003); Shi *et al.*, (2013) y Ginebra-Aguilar *et al.*, (2015), señalan resultados similares, estratos inferiores del suelo (mayores a 10 cm), la tasa de C orgánico decrece por la baja presencia de materia orgánica (hojarasca, raíces y restos vegetales) y su mineralización. De este modo, la cantidad de materia orgánica en el suelo es un indicador que permite determinar las diferencias en las reservas de C con respecto a factores como la profundidad y tipo de suelo, considerándose sensibles a los cambios en las concentraciones de C orgánico el suelo.

Las diferencias estadísticas entre épocas de muestreo que se presentaron en los sistemas evaluados también pueden estar relacionadas con las características propias del estrato arbóreo de los sistemas, ya que la flora es sub-caducifolia. Su principal característica es perder la mayor parte de su follaje, aumentando la tasa de producción de hojarasca que se incorpora al suelo en los sitios de estudios (Flores-Guido *et al.*, 2010). Esto favorece que para el inicio de la época de lluvias se presente una mayor mineralización de la materia orgánica del suelo, ya que la precipitación media anual (PMA) de los sitios de estudio oscila entre 1000-1200 mm, según fuentes del INEGI (2011), aumentando periódicamente conforme transcurre la época de lluvias en la región evaluada.

Esta misma diferencia entre época del año concuerda con lo registrado por Dai *et al.*, (2014) y Arellano (2017), quienes señalan resultados similares a este estudio, al observar en Yucatán en el mismo tipo de vegetación de selva mediana sub-caducifolia, que los flujos de COS aumentan en la época de lluvia y conforme se registran mayores índices de PMA. Siendo factores clave, la mineralización de la MOS, y la cantidad de biomasa aérea de la vegetación leñosa que componen estos sistemas, y con la mayor disponibilidad de agua, aumentan los aportes de C al suelo (Kume *et al.*, 2013). Por lo tanto, la presencia de la hojarasca en el suelo y el aumento en la disponibilidad de agua a por las precipitaciones nos determinaron mayores concentraciones de C en los sitios evaluados.

Sin embargo, la tendencia observada durante épocas de muestreo en el estudio no concuerda con autores que afirman que durante la época de lluvia y a mayor PMA la concentración de C en el suelo disminuye por las limitaciones del suelo de oxigenación y descomposición de la materia orgánica, ya que a mayor prolongación de lluvias el exceso de humedad se presenta una saturación en el suelo que limita la mineralización de MO por la actividad microbiana (Dai *et al.*, 2013; Bejarano *et al.*, 2014; Campo *et al.*, 2016). Por otro lado, en el estudio no se observó esta tendencia, en mayor medida por las características físicas de los suelos evaluados que poseen un buen drenaje y retención de humedad que le brindan al suelo las condiciones necesarias para descomponer la materia orgánica e incorporarla al suelo en forma de CO. Mientras tanto, otros autores afirman que a mayor temperatura del año y durante la época de seca, las concentraciones de C en el suelo aumentan al presentar condiciones favorables en el suelo (mayor espacio entre partículas) para la mineralización de la MO (Hontoria *et al.*, 2004; Herrera, 2017).

CONCLUSIONES

El sistema de vegetación natural de selva mediana sub-caducifolia presentó el contenido de carbono total más alto en el estudio con 9.18 g de C kg⁻¹. Siendo mejores reservorios de CO en el suelo que los solares. A su vez, el valor más alto en los huertos familiares fue de 7.95 g de C kg⁻¹, este valor aunque un 15% más bajo que el de la selva sugiere que los solares también son importantes sumideros de carbono.

El mayor almacenamiento de COS en los dos sistemas de manejo evaluados en el estudio se registró en los suelos negros en profundidades superficiales de 0-10 cm, durante la época de lluvias. Esto nos permite considerarlas como las condiciones que favorecen la acumulación de C en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

A los doctores, Michael F. Allen y Edith B. Allen de la Universidad de California; Riverside, Departamento de biología por las observaciones realizadas a este trabajo.

Al M. en C. José Luis Cámara Romero, por el apoyo brindado en campo y a la M. en C. Mariana López Díaz por su asesoría en los análisis desarrollados.

A UC MEXUS-CONACYT, por el financiamiento por medio del proyecto “Effect of land use, soil type and agricultural practices on preserving organic soil carbon stocks” (Clave SISTPROY: FMVZ-2014-0013).

LITERATURA CITADA

Aguila-Alcantara, E. 2007. Soil fertility in calcareous tropical soils from Yucatan, Mexico, and Villa Clara, Cuba, affected by land use and soil moisture effects. Göttingen, Cuvillier Verlag, 147 p.

Altieri, A; Nicholls, C; Henao, A. and Lana, M. 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 35: 869-890 pp.

Anderson, J. and Ingram, J. 1993. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods. CAB International. Wallingford, Reino Unido. 10 p.

Arellano, F. 2017. Flujo de CO₂ del suelo en una selva mediana subcaducifolia en Yucatán, México. Centro de Investigación Científica en Yucatán (CICY) A.C. tesis para otorgar el grado de Maestría en Ciencias: Recursos Naturales. 133 p.

Bautista, F; y Palacio, G. 2005. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, UADY, SEMARNAT, INECOL. 281 pp.

Bejarano, M; Crosby, M; Parra, V; Etchevers, J. and Campo, J. 2014. Precipitation regime and nitrogen addition effects on leaf litter decomposition in tropical dry forests. *Biotropica* 46: 415-424 pp.

Benjamín, T; Montañez, P; Jiménez-Osornio, J. and Gillespie, A. 2001. Carbon, water and nutrient flux in Mayan homegardens in the Yucatan Peninsula of Mexico. *Agroforestry Systems* 53: 103-111 pp.

Burbano-Orjuela, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Rev. Cienc. Agr.* 35(1): 82-96 pp.

Campo, J; García-Oliva, F; Navarrete, A. y Siebe, C. 2016. Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Terra Latinoamericana*. Vol-34 (1): 31-37 pp.

Cotler, H; Martínez, M. y Etchevers, J. 2016. Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación políticas públicas. *Terra Latinoamericana* 34: 125-138 pp.

Dai, Z; Bridsey, K; Jonhson J; Dupuy, J. Hernandez-Stafanoni, L. and Richardson, K. 2014. Modelling carbon Stock in a Secondary Tropical Dry Forest in the Yucatan peninsula, Mexico. *Water Air Soil Pollut*, 225 (1925). 1-15 pp.

Dai, Z; Trettin, C; Li, G; .Sun, D; Amatya, C and Li, H.. 2013. Modeling the impacts of climate variability and hurricane on carbon sequestration in a coastal forested wetland in South Carolina”, *Natural Science*, núm. 5, 375-388 pp.

Delgado, J; Nearing, M; and Rice, C. 2013. Chapter two. Conservation practices for climate change adaptation. *Adv. Agron.* 121: 47-115 pp.

Estrada-Medina, H; Bautista, F; Jiménez-Osornio, J; González-Iturbe, J. and Aguilar Cordero, W. 2013. Maya and WRB Soil Classification in Yucatan, Mexico: Differences and Similarities. *Soil Science*. 10 pp.

Etchevers, J; De Jong, B; Paz, F; Saynes, V; Hidalgo, C; Cruz, C; Carrasco, M. y Padilla, J. 2011. Carbono y sector agropecuario. Seminario Hacia REDD++: Integración de

Políticas Forestales y Agropecuarias UAEM, Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. 64 p.

FAO. 2017. Soil carbon sequestration for improved land management. World soil reports 96. Rome. 58. <http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGL/agII/globdir/index.htm>. (Consultado el 15.01.19).

Fassbender, H. 1980. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, I.I.C.A. 398 p.

Flores-Guido, J; Durán García, R y Ortiz-Díaz, J. 2010. Comunidades vegetales terrestres. En: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Durán R. y M. Méndez (Eds). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 125-129 pp.

Galicia, L; Gamboa, A. M; Silke, C; Chávez, B; Vergara, V; Ramírez, P; Saynes, V y Siebe, C. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.

Ginebra-Aguilar, M; Rodríguez Alfaro, M; Calero Martin, B; Ponce de León, D. y Font Vila, L. 2015. Carbono lábil como un indicador de cambios en dos suelos bajo diferentes usos. *Cultivos Tropicales*, 2015, vol. 36, no. 3. 64-70 pp.

Haile, S; Nair, V. And Nai, P. 2010. Contribution of trees to carbón storage in soil of silvopastoral systems in Florida. USA. *Global Shang Biol.* 16: 427-438 pp.

Herrera, M. 2017. Estimación del contenido de carbono en suelos con diferentes usos en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras. Tesis de Licenciatura. Carrera de Ambiente y Desarrollo. 45 p.

Hontoria, C; Rodríguez-Murrillo, J; y Saa, A. 2004. Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España peninsular. *Edafología*, Vol. 11(2):149-157 pp.

INEGI. 2011. Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Serie V. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/> (Consultado el 05.01.15)

IPCC. 2007. Cambio Climático, Informe de síntesis. Una evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio climático. 94. 35 p.

Jaramillo, V. 2004. El ciclo global del Carbono. Cambio climático: una visión desde México. INE/SEMARNAT. México, D.F. 16–27 pp.

Jaramillo, V. 2007. Ciclo global del Carbono. Instituto Nacional de Ecología. UNAM. <file:///C:/Users/Alberto%20Gio/Desktop/Instituto%20Nacional%20de%20Ecolog%C3%ADa.htm>. (Consultado el 10.02.16).

Jiménez-Osornio, J; Zarco Salgado, M. Lendechy Grajales, A. y Becerril García, J. 2015. Los solares: Una oportunidad para contribuir a la seguridad alimentaria, mitigación y cambio climáticos en Yucatán. En: Canto, R. y Zarco, M. (Eds). *Extensión y Responsabilidad Social: Los proyectos sociales en comunidades de aprendizaje implementados en la UADY*. 237-264 pp

Jiménez-Osornio, J; Durán García, R; Dupuy Rada, J. y González-Iturbe, J. 2010. Uso del suelo y vegetación secundaria. En: *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. Durán R. y M. Méndez (Eds). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 460-464 pp.

Kume, T; Tanaka, N; Yoshuifuji, N; Chatchai, T; Igarashi, Y; Suzuki, M and Hashimoto, S. 2013. Soil respiration in response to year-to-year variations in rainfall in a tropical seasonal forest in northern Thailand. *Ecohydrology*. 6 (1): 134-141 pp.

Kauffman J; Donato, D; y Adame, M. 2013. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de Trabajo 117. Bogor, Indonesia: CIFOR. 48 p.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627 pp.

Liu, X; Han, X; Song, C; Herbert S; Xing, B. 2003. Soil organic carbon dynamics in black soils of China under different agricultural management system. *Communications in soil science and plant analysis*. Vol 34, pp 973-984 pp.

Mariaca, R; González, A; y Arias, L. 2010. El huerto maya yucateco en el siglo XVI. ECOSUR, CINVESTAV-Mérida, UIM-QRoo, CONACYT. 180 pp.

Matus, F; y Maire, C. 2000. Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agric. Téc.* Vol. 60(2).

Montañez-Escalante, P; Ruenes-Morales, R; Ferrer-Ortega, M. y Estrada-Medina, H. 2014. Los huertos familiares Maya–Yucatecos: situación actual y perspectivas en México. *Rev. Ambienta. España*. Vol. (107): 10.

Moya-García, X; Caamal, A; Ku, B; Chan, E., Armendáriz, I; Flores, J., Moquel, J; Noh, M., Rosales, M. y Xool, J. 2003. La agricultura campesina de los mayas en Yucatán. *Leisa. Rev. Agroecología*. Ocho estudios de caso. 7-17 pp.

Okalebo, J; Gathua, K; and P. Woomeer. 1993. Laboratory methods of soil and plant analysis: a working manual. KARI, SSSEA, TSBF, UNESCO. Nairobi, Kenia. 88 p.

Ordoñez, J; De Jong, B., García-Oliva, F; Aviña, F; Pérez, J;. Guerrero, G., Martínez, R. and O. Masera. 2008 a. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the central highlands of Michoacán, México. *Forest ecology and management*, (255): 2074–2084 pp.

Sánchez-Hernández, R; Ramos-Reyes. R; Geissen, V; Mendoza-Palacios, J de D; De la Cruz-Lázaro, J; Salcedo-Pérez, E y Palma-López, D. (2011). Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana* 29: 211-219 pp.

Segura-Castruita, M; Sánchez-Guzmán A; Ortiz-Solorio, P; y Gutiérrez-Castorena, C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México *Terra Latinoamericana*, Universidad Autónoma Chapingo, México. Vol. 23 (1): 21-28 pp.

Shang, C. and Tiessen, H. 2003. Soil organic C sequestration and stabilization in karstic soils of Yucatan. *Biogeochemistry* 62: 177-196 pp.

Shi, S; Zhang W; Zhang, P; Yu, Y. y Ding, S. 2013. A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soil. *For Ecol Manag* 296: 53-63 pp.

Singh, S; Singh, A, Sharma, B.and Tarafdar, J. 2007. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India: *Journal of Arid Environments*, 68, 408–421 pp.

Sweetwood R; Terry, R; Beach T; Dahlin B, and Hixson D. 2009. The Maya footprint: Soil

resources of Chunchucmil, Yucatán, Mexico. Soil Science Society of American Journal 73: 1209-1220 pp.

Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An Examination of Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Sci. 37:29-37.

WRB. 2015. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO. Rome.

Zamora-Cresencio P; Flores Guido, J. y R. Ruenes-Morales. 2009. Flora útil y su manejo en el cono sur del estado de Yucatán, México. Polibotánica (28): 227-250.

ANEXOS

Anexo 1. ANOVA de COS los sistemas evaluados

F.V.	SC	gl	CM	F	<i>P-valor</i>
Modelo	1000.44	15	66.70	14.72	< 0.0001
Manejo	30.48	1	30.48	6.73	0.0100
Suelo	703.75	1	703.75	155.34	< 0.0001
Época	173.92	1	173.92	38.39	< 0.0001
Profundidad	52.32	1	52.32	11.55	0.0008
Manejo-suelo	15.13	1	15.13	3.34	0.0687
Manejo-profundidad	1.61	1	1.61	0.22	0.6413
Manejo-época	0.99	1	0.99	0.36	0.5516
Época –profundidad	0.16	1	0.16	0.04	0.8502
Suelo-profundidad	10.16	1	10.16	2.24	0.1355
Suelo-época	7.42	1	7.42	1.64	0.2016
Manejo-suelo-época	2. 4E-04	1	2. 4E-04	5. 3E-05	0.9942
Manejo-suelo-profundidad	2.53	1	2.53	0.56	0.4555
Manejo-época-profundidad	1.47	1	1.47	0.32	0.5693
Suelo-época-profundidad	0.41	1	0.41	0.09	0.7629
Manejo-suelo-época-profundidad	0.09	1	0.09	0.02	0.8853
Error	1232.22	272	4.53		
Total	2232.66	287			