

Contenido de carbono orgánico en suelos del Área Natural Protegida “Sierra de Otontepec”

Organic carbon content in soils of the Natural Protected Area “Sierra de Otontepec”

Gabriela Monserrat Cancela de los Santos, Jorge Luis Chagoya-Fuentes, Rocío Rodríguez Cabrera, José Luis Alanís-Méndez

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Campus Tuxpan. Universidad Veracruzana.
Dirección postal: Carretera Tuxpan-Tampico Km 7.5 Col. Universitaria. C.P. 92870. Tuxpan, Veracruz. México

NOTA SOBRE LOS AUTORES

Gabriela Monserrat Cancela de los Santos: monseds@hotmail.com

Jorge Luis Chagoya-Fuentes: jochagoya@uv.mx,  <https://orcid.org/0000-0001-5139-6322>

Rocío Rodríguez Cabrera: rocrodriiguez@uv.mx,  <https://orcid.org/0000-0001-6329-426X>

José Luis Alanís-Méndez: alanis@uv.mx,  <https://orcid.org/0000-0002-2140-7139>

Esta investigación fue financiada con recursos de los autores.

Los autores no tienen ningún conflicto de interés al haber hecho esta investigación.

Remita cualquier duda sobre este artículo a Jorge Luis Chagoya-Fuentes.

RESUMEN

En el Área Natural Protegida (ANP) “Sierra de Otontepec” existen diversos ecosistemas y usos de suelo, tales como Bosque Mesófilo (BM), Pasturas Naturales (PN), Milpa Tradicional (MT) y Huerto Citrícola (HC), los cuales ofertan diversos servicios ambientales (SA), entre ellos fijación de Carbono (C) en el suelo. Desafortunadamente, no se cuenta con información básica de la cantidad de Carbono Orgánico (CO) que existe en ellos. Para lograr el objetivo, se muestrearon cuatro usos de suelos BM, PN, MT y HC, con cuatro repeticiones cada uno y a cinco profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm, respectivamente). En ellos, se determinó el porcentaje (%) de CO mediante el método de Walkley y Black y la Densidad Aparente (DA) (gr cm^3) por el

Recibido: 03/12/2021

Aceptado: 24/03/2022

Publicado: 30/06/2022



Copyright © 2022 Gabriela Monserrat Cancela de los Santos, Jorge Luis Chagoya-Fuentes, Rocío Rodríguez Cabrera y José Luis Alanís-Méndez.
Esta obra está protegida por una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

método de la probeta. Para el análisis estadístico se utilizó el Software Statística® V.10.0. Los resultados indican que, BM registró los mayores porcentajes de CO y presentó diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) en diferentes profundidades en comparación con los otros usos de suelo. Para la DA, el HC presentó la mayor DA (gr cm^3) en contraste con los demás usos del suelo. En cuanto al contenido de CO (Mg Ha^{-1}) en la totalidad del perfil analizado (0-100 cm), BM presentó diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) con respecto a los demás usos del suelo. Finalmente, se concluye que los suelos donde existe BM tienen una mayor cantidad de CO, lo cual puede incentivar la creación de un esquema local de pago de SA.

Palabras Clave: Bosque Mesófilo; Densidad Aparente; Neotrópico; Servicios Ambientales; Stock de Carbono; Walkley y Black.

ABSTRACT

In the Natural Protected Area (NPA) "Sierra de Otontepec" there are some ecosystems and land uses, such as Mesophilic Forest (BM), Natural Pastures (PN), Traditional Milpa (MT) and Citrus Orchard (HC), which offer several environmental services (ES), including soil Carbon fixation. Unfortunately, there is no basic information about the amount of Organic Carbon (CO) that exists in them. To achieve the objective, soils under BM, PN, MT and HC were sampled, with four repetitions, and five depths (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 and 60-100 cm, respectively). In them, the percentage (%) of CO was determined by the Walkley & Black method, and the Apparent Density (DA) (gr/cm^3) by the test tube method. Also, the Statística® Software V.10.0 was used to perform the statistical analysis. Results indicated, that BM registered the highest percentages of CO and presented a statistically significant difference ($P < 0.05$) at different depths compared to other land uses. Additionally, HC recorded the highest DA (gr/cm^3) in contrast with the other land uses. Also, regarding the content of CO (Mg Ha^{-1}) in the entire profile analyzed (0 - 100 cm), BM showed statistically significant difference ($P < 0.05$) with respect to the other land uses. Finally, it is concluded that the soils where BM exists have a greater amount of CO. Information, that can encourage the creation of a local ES payment scheme.

Keywords: Apparent Density; Carbon Stock; Environmental Services; Neotropic; Mesophilic Forest; Organic Matter; Walkley y Black.

INTRODUCCIÓN

Desde hace más de dos décadas se argumenta que los ecosistemas pueden brindar diversos servicios ambientales a la humanidad, tales como conservación de la biodiversidad, protección del suelo para recarga de acuíferos, fijación de carbono atmosférico (CO_2), belleza paisajística, entre otros (Pagiola *et al.*, 2002; Scherr *et al.*, 2004; Wunder, 2006; Pagiola, 2008; Ezzine-de-Blas *et al.*,

2016; Santos de Lima, 2019). De los servicios mencionados con anterioridad, se ha comentado que la fijación de CO₂ por los ecosistemas es una forma de reducir los niveles de este gas de efecto invernadero en la atmósfera (Bruce *et al.*, 1999; Schlesinger, 1999; Paustian *et al.*, 2000; Mutuo *et al.*, 2005; Muñoz *et al.*, 2010; Amundson y Biardeaub, 2018).

Adicionalmente, se ha documentado que la fracción más estable de Carbono (C) retenido en los bosques y paisajes fragmentados, es el que se encuentra en el suelo (Scharlemann *et al.*, 2014), y que su cantidad en el perfil, irá de la mano con su génesis, el manejo y el ecosistema donde esté localizado (Buragienè *et al.*, 2019).

Aunado a lo anterior se ha demostrado que, dentro del perfil del suelo, la fracción más dinámica del C es la que se encuentra en los estratos superiores (0 – 40 cm) ya que está en íntimo contacto con el bioma del suelo (FAO, 2017). Además, de ser el más susceptible a cambiar en el corto y mediano plazo (1–20 años) debido a alguna actividad antropogénica (FAO, 2009). Por lo contrario, el contenido de carbono depositado en los estratos inferiores está condicionado por la génesis del mismo y modificar sus características de forma natural, puede llevar al ecosistema miles o millones de años (FAO, 2017).

Cabe resaltar que a pesar de la gran relevancia que tiene este tema, se tiene escaso conocimiento de la cantidad de C en los suelos del mundo (FAO & ITPS, 2015). En el caso específico de México, Paz *et al.* (2016), realizaron un interesante estudio sobre la distribución espacial y temporal del carbono orgánico en los ecosistemas terrestres de México. Dónde indican que se requieren más estudios en esta área, debido a la gran variabilidad en climas, tipo de ecosistemas y suelos. Adicionalmente, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) dentro del Proyecto REDD+ ha tratado de desarrollar metodologías y estrategias para determinar el contenido de C en los ecosistemas forestales del territorio nacional (CONAFOR, 2018).

En el Norte del Estado de Veracruz, se encuentra la llanura costera del Golfo de México la cual está basada en roca sedimentaria del Cretácico (145 millones de años) y posee depósitos sedimentarios del Cenozoico (66 millones de años) (Velázquez y Ordaz, 1994). Posteriormente, en el Plioceno (5 millones de años), se desarrolló un proceso volcánico fisural el cual dio origen a la actualmente denominada “Sierra de Otontepec” (Robin, 1976). Esta montaña, la cual se levanta por arriba de los 1,300 m.s.n.m., fue decretada en marzo del 2005 como Área Natural Protegida (ANP), en su categoría de reserva ecológica por el Gobierno del Estado de Veracruz (Gaceta Oficial del Estado de Veracruz, 2005). En el decreto se justificó su protección, debido a los importantes servicios ambientales que ofrece a la población de la región, los cuáles son; agua, biodiversidad, fijación de carbono y belleza escénica.

Sin embargo y en el caso específico del contenido de C, no se tiene ningún estudio sobre la cantidad de C almacenado en los diversos ecosistemas que conforman esta ANP, el cual, ayude

a desarrollar una línea base para la creación de esquemas locales de Pago por Servicios Ambientales (PSA) por la fijación de CO₂ atmosférico y/o la no emisión del C almacenado en el suelo (Stock). Debido a lo anterior, el presente estudio surge como una primera iniciativa para cuantificar el contenido de Carbono Orgánico (CO) en Megagramos por Hectárea (Mg Ha⁻¹) en diferentes usos de suelo del ANP “Sierra de Otontepec”.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dentro de la poligonal del ANP, se muestrearon cuatro usos de suelo: Bosque Mesófilo (BM), Pasturas Naturales (PN), Milpa Tradicional (MT) y Huerto Citrícola (HC), en cuatro sitios distintos, cuidando que estuvieran a más de un kilómetro de distancia entre ellos (Figura 1). Adicionalmente, los suelos se muestrearon a cinco profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm, respectivamente) (FAO 2009, Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013). Para la determinación del contenido de CO se utilizó el Método de Walkey-Black (1934) y para la Densidad Aparente (DA) se utilizó el Método de la Bureta (Guevara y Rojas, 2009, Romero-Barrios *et al.*, 2015). Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias – Campus Tuxpan, de la Universidad Veracruzana.

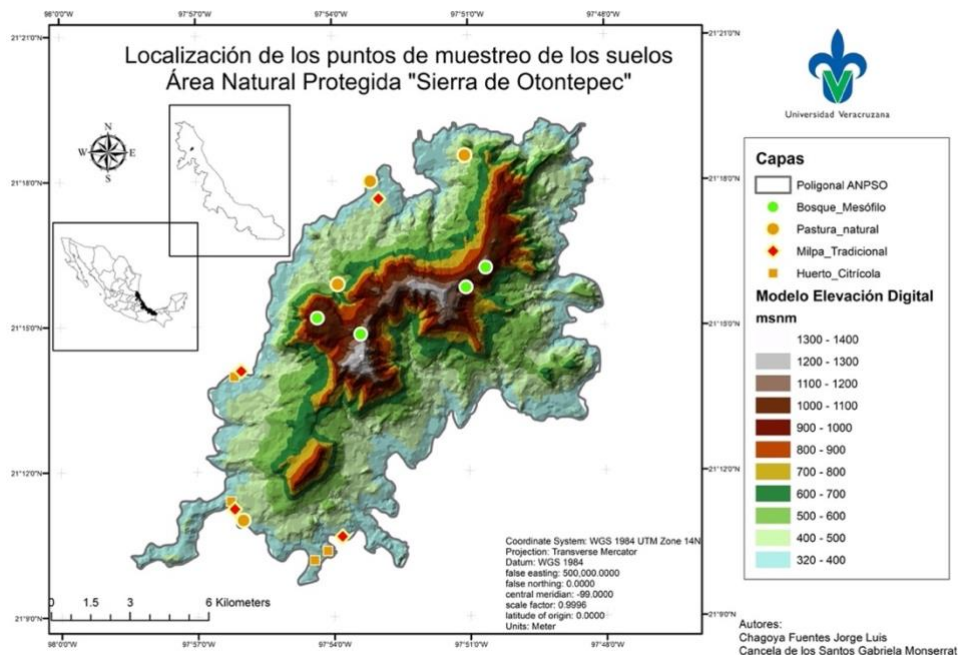


Figura 1.- Sitios de muestreo de los suelos bajo Bosque Mesófilo (BM), Pastura Natural (PN), Milpa Tradicional (MT) y Huerto Citrícola (HC). Área Natural Protegida “Sierra de Otontepec”, Norte de Veracruz, México.

El análisis estadístico se realizó con el uso de Software Statistica® V.7, dónde se aplicó la prueba de Normalidad de Shapiro-Wilk ($P > 0.05$) y en los casos donde existió normalidad, se procedió a realizar un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si las medias poblacionales de los usos de suelo tenían diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) y en caso de ser requerido, se aplicó la prueba HSD (Honestly-significant-difference) de Tukey. En los casos dónde no existió Normalidad, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para determinar si existía diferencia estadística significativa $P (< 0.05)$ entre las medias poblacionales y posteriormente, en caso necesario se llevó a cabo la prueba U de Mann-Whitney para determinar entre qué usos de suelo existía dicha diferencia estadística.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cuanto al porcentaje (%) de CO dentro del perfil, se puede apreciar en la Figura 2 una tendencia similar en todos los usos de suelo, donde el mayor porcentaje se encuentra en los primeros centímetros, decreciendo paulatinamente conforme se profundiza en el perfil. Así mismo, se observa que los suelos del BM poseen el mayor porcentaje de CO en todas las profundidades (5.59, 4.23, 2.99, 1.96 y 1.5% para 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-100 cm, respectivamente) y presentan diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) con otros usos de suelo (MT y HC). Dicha tendencia es similar a lo reportado por Islas-López *et al.* (2014) donde en bosques de Pino-encino determinaron; 8.16, 4.23, 1.35 y 0.63% para 0-5, 5-20, 20-40, 40-60 cm, respectivamente. Adicionalmente, se puede observar en la Figura 3 la distribución vertical porcentual (%) del contenido de CO en todas las muestras realizadas. Donde, se aprecia que existe una gran variación en la distribución del CO dentro de los perfiles muestreados, incluso en los mismos usos de suelo. Lo anterior es similar a lo reportado por Pérez-Ramírez *et al.* (2013), para el contenido de CO en suelos de bosques de Oyamel y Pino-Encino en la Reserva de la Biosfera “Mariposa Monarca, México. Donde, el porcentaje de CO en los primeros centímetros del suelo (0 – 40 cm) puede deberse al efecto de la cobertura vegetal o ecosistema presente, pero también al manejo agronómico y/o silvocultural de los suelos (FAO, 2002). Sin embargo, a mayor profundidad (>50 cm), tal distribución puede deberse a factores propios de la génesis del suelo (FAO, 2017) y en el caso específico de la Sierra de Otontepec, lo anterior puede deberse a que sus suelos tienen un origen volcánico con lavas basálticas de tipo alcalino (Robin, 1976), y a su posición orográfica final, después de millones de años de procesos coluviales y meteorización.

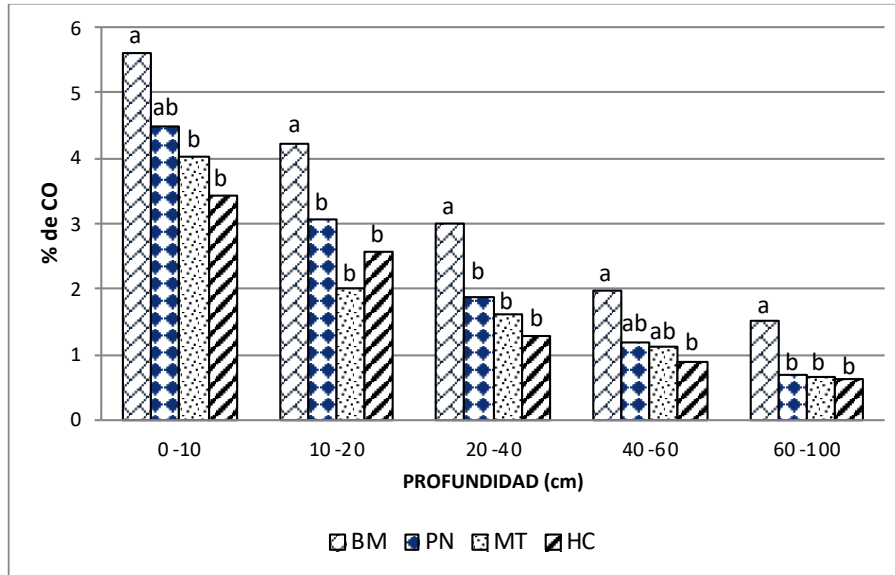


Figura 2.- Porcentaje (%) de Carbón Orgánico (CO) en los suelos de Bosque Mesófilo (BM), Pastura Natural (PN), Milpa Tradicional (MT) y Huerto Citrícola (HC), localizados dentro de la poligonal del Área Natural Protegida “Sierra de Otontepec”, Norte de Veracruz, México.

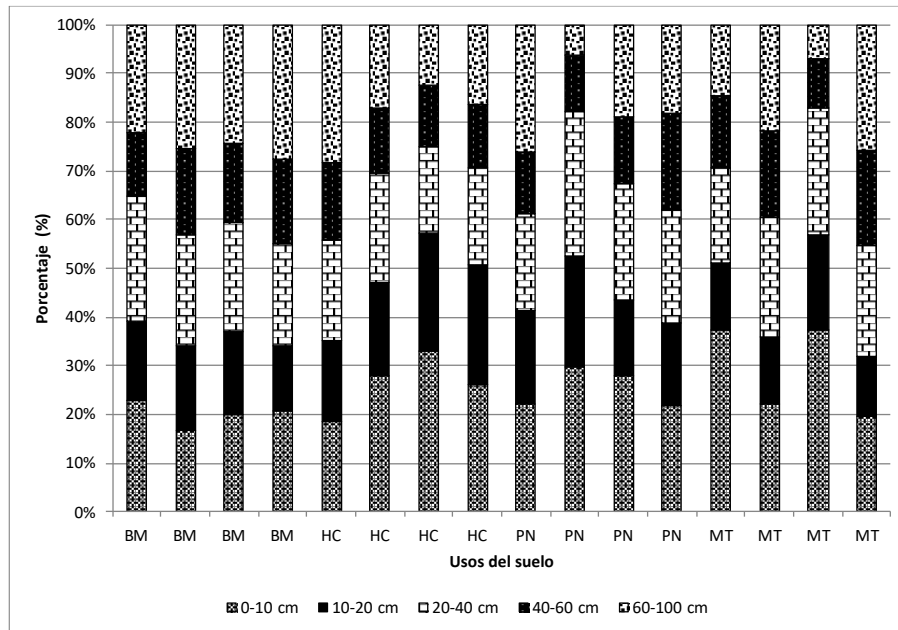


Figura 3.- Porcentaje de Carbono Orgánico (CO) del suelo a cinco profundidades (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-100 cm) y en cuatro usos de suelo; Bosque Mesófilo (BM), Huerto Citrícola (HC),

Pastura Natural (PN) y Milpa Tradicional (MT), pertenecientes al Área Natural Protegida “Sierra de Otontepec”, Norte de Veracruz, México.

En el caso de la DA (gr cm^3) en los suelos a las diferentes profundidades (Figura 4), los parámetros fluctúan entre 1 y 1.7 gr cm^3 , los cuales están dentro de los parámetros normales (USDA, 1996). Además, se observa que la DA se va incrementando conforme se profundiza en el perfil del suelo. Lo cual indica que los suelos tienen una mayor compactación a mayor profundidad (Beltrán, 2018). Adicionalmente, se puede comentar que los suelos de BM presentan la menor DA en todas las profundidades muestreadas y tienen diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) con otros usos de suelo (HC y MT). Los resultados anteriores están en concordancia con lo reportado por Fernández-Romero *et al.* (2014), cuando comparó los suelos de los bosques Mediterráneos y Cultivo de Olivo a diferentes profundidades. También López (2014), encontró una tendencia similar al comparar suelos Forestales con suelos bajo manejo agrícola (1.08 y 1.43 gr cm^3 , respectivamente).

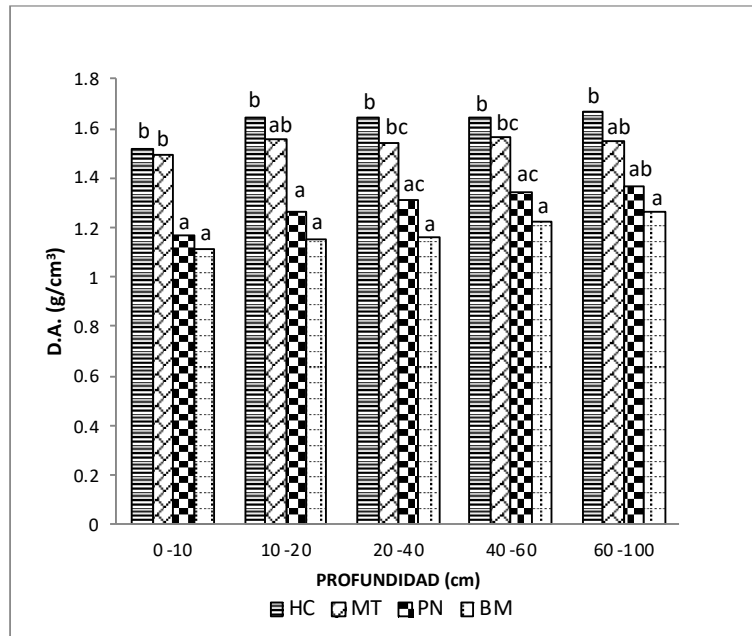


Figura 4.- Densidad Aparente (DA) en gr cm^3 en los suelos de Bosque Mesófilo (BM), Pastura Natural (PN), Milpa Tradicional (MT) y Huerto Citrícola (HC), localizados dentro de la poligonal del Área Natural Protegida “Sierra de Otontepec”, Norte de Veracruz, México.

Por su parte, en el Tabla 1 se presenta el contenido del CO en Mg Ha^{-1} en los diferentes usos de suelo y a las cinco profundidades muestreadas. En cuanto al contenido de CO en la totalidad del

perfil (0 –100 cm) es relevante indicar que BM registró la mayor cantidad y presentó diferencia estadística significativa ($P < 0.05$) en comparación con los otros usos de suelo (330.4^a , 214^b , 209.4^b y 204.7^b Mg Ha.⁻¹ para BM, MT, PN y HC, respectivamente). En contraste, el comportamiento estadístico del contenido de CO es variable en las diferentes profundidades. Donde en los primeros centímetros (0 – 10 cm) el contenido de CO fue mayor en BM y presentó diferencia estadística significativa con PN y HC (70.3^a , 58.8^{ab} , 52.0^b y 51.9^b Mg Ha.⁻¹ para BM, MT, PN y HC, respectivamente). En el caso del contenido de CO de 10 – 20 cm, BM registró la mayor cantidad, pero solo tuvo diferencia estadística con MT (48.6^a , 31.1^b , 38.6^{ab} , y 42.0^{ab} Mg Ha.⁻¹ para BM, MT, PN y HC, respectivamente). En cuanto al contenido de CO de 20 – 40 cm, existe diferencia estadística significativa entre BM y HC (70.2^a , 50.0^{ab} , 49.5^{ab} , 41.6^b Mg Ha.⁻¹ para BM, MT, PN y HC, respectivamente). En el caso de la cantidad de CO de 40 a 60 cm, se observa que BM tiene el mayor valor y diferencia estadística significativa con PN y HC (48.3^a , 34.7^{ab} , 30.9^b y 28.7^b Mg Ha.⁻¹ para BM, MT, PN y HC, respectivamente). Finalmente, en cuanto al contenido de CO entre los 60 y 100 cm, BM presentó el mayor valor, pero no existe diferencia estadística significativa entre los tratamientos (75.4^a , 40^a , 38.2^a y 40.5^a Mg Ha.⁻¹ para BM, MT, PN y HC, respectivamente).

Tabla 1.- Contenido de Carbono Orgánico (CO) en Mg Ha⁻¹ en los Suelos de Bosque Mesófilo (BM), Milpa Tradicional (MT), Pastura Natural (PN) y Huerto Citrícola (HC), localizados dentro de la poligonal del Área Natural Protegida “Sierra de Otontepec”, Norte de Veracruz, México.

Profundidad (cm)	Bosque Mesófilo (BM)	Milpa Tradicional (MT)	Pastura Natural (PN)	Huerto Citrícola (HC)
0 - 10	70.3 ^a	58.8 ^{ab}	52.0 ^b	51.9 ^b
10 - 20	48.6 ^a	31.1 ^b	38.6 ^{ab}	42.0 ^{ab}
20 - 40	70.2 ^a	50.0 ^{ab}	49.5 ^{ab}	41.6 ^b
40 - 60	48.3 ^a	34.7 ^{ab}	30.9 ^b	28.7 ^b
60 - 100	75.4 ^a	40.1 ^a	38.2 ^a	40.5 ^a
Total del Perfil	330.4 ^a	214.7 ^b	209.4 ^b	204.7 ^b

El comportamiento anterior es similar a lo reportado por Pérez-Ramírez *et al.* (2013), en donde determinaron el contenido del CO (Mg Ha.⁻¹) en todo el perfil del suelo en bosques de Oyamel y Pino Encino conservados versus Aprovechados y Perturbados. Encontrando, que los suelos de bosques de Oyamel bajo conservación poseen cantidades superiores de CO a los suelos con bosques perturbados y aprovechados (153, 125 y 95 Mg Ha.⁻¹, respectivamente). Además, al determinar la distribución vertical del CO identificaron que su mayor contenido se encuentra en

los primeros 40 centímetros del suelo y que existe una gran heterogeneidad en la distribución del CO en los perfiles muestreados.

Aunado a lo anterior, Solís *et al.* (2014), determinaron el contenido de CO (Mg Ha.⁻¹) a tres diferentes profundidades (89.14^a, 58.53^b y 26.61^c Mg Ha.⁻¹ para 0-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente) en rodales de pino – encino, con diferente calidad de sitio (63.12^a, 60.90^a y 50.27^b Mg Ha.⁻¹ para bueno, regular y malo, respectivamente) y tratamiento silvícola (58.47^a, 58.44^a y 57.38^a Mg Ha.⁻¹ para cortas de selección, aclareos y cortas de regeneración, respectivamente). Por su parte, Fernández-Romero *et al.* (2014), determinaron el contenido de CO (Mg Ha.⁻¹) a cuatro profundidades (0-25, 25-50, 50-75, 75-100 cm) en bosques mediterráneos conservados (NF) y plantaciones de olivo (OG). Donde NF presentó el mayor contenido de CO en comparación con OG (69 y 34.9 Mg Ha.⁻¹, respectivamente).

CONCLUSIONES

En todos los usos de suelo se determinó que el mayor porcentaje de CO se encuentra en los primeros centímetros de suelo y que este porcentaje es menor en los usos donde no se tiene una cobertura natural. Lo anterior toma relevancia en el sentido de que, debe evitarse el cambio de uso de suelo en ecosistemas tan biodiversos como los bosques mesófilos de montaña y en el caso donde los suelos sean abiertos a la agricultura, se debe tener la precaución de implementar prácticas agronómicas sustentables para evitar un balance negativo en la emisión de CO² a la atmósfera.

Los suelos bajo BM en el ANP “Sierra de Otontepec” poseen el mayor contenido de CO y la menor DA en todo su perfil en comparación con los otros suelos muestreados bajo diferentes usos. Lo anterior indica su relevancia como proveedor del servicio ambiental en la retención y captura de CO². Adicionalmente, los suelos con presencia de BM pueden ayudar significativamente en la provisión de un servicio ambiental hídrico, al permitir el paso adecuado del agua a través de todo el perfil. Por el contrario, los suelos con menor cantidad del CO y la mayor DA fueron consistentemente los suelos bajo HC, lo cual los limita en la provisión de servicios ambientales.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se realizó con los fondos del PRODEP – SEP, en el Proyecto con Folio: UV-PTC-877. Al apoyo de los Ejidatarios de la Sierra Otontepec. Al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias – Campus Tuxpan.

LITERATURA REVISADA

- Álvarez-Arteaga, G., García, C.N.E., Krasilnikov, P., García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 47, p.p. 171-180.
- Amundson, R., Biardeaub, L. (2018). Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 115, p.p. 11652–11656. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>
- Beltrán, M.J.L. (2018). Propiedades físicas de los suelos, un recurso natural prestador de servicios biológicos y ambientales. Artículo en Revisión. *Biological Reseach*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/323906391>
- Bruce, J.P., Frome, M., Haites, E., Janzen, H., Lal, R., Paustian, K. (1999). Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*. 54(1) p.p. 382-389.
- Buragienė, S., Šarauskis, E., Romaneckas, K., Adamavičienė, A., Kriaučiūnienė, Z., Avižienytė, D., Marozas, V., Naujokienė, V. (2019). Relationship between CO₂ emissions and soil properties of differently tilled soils. *Science of the Total Environment* 662, p.p. 786–795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.236>
- CONAFOR (2018). Memoria Documental: Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal y la Conservación e Incremento de Acervos de Carbono Forestal (REDD+). México. 63 p.
- Ezzine-de-Blas, D., Wunder, S., Ruiz-Pérez, M., Moreno-Sanchez, R.P. (2016). Global Patterns in the Implementation of Payments for Environmental Services. *PLoS ONE* 11(3): e0149847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149847>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2002). Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra. Informes Sobre recursos Mundiales de Suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. Vol. 96. 70 p. <https://doi.org/10.18356/a48b842b-es>
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2009). La Larga Sombra del Ganado: problemas ambientales y opciones. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia. 493 p. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2018.62.07>
- Food and Agriculture Organization [FAO] and Intergovernmental Technical Panel on Soils [ITPS]. (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. 648 p. <https://doi.org/10.2172/1329289>

- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia. 90 p. <https://doi.org/10.18356/a48b842b-es>
- Fernández-Romero, M.L., B. Lozano-García, B., Parras-Alcántara, L. (2014). Topography and land use change effects on the soil organic carbon stock of forest soils in Mediterranean natural areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 195: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.015>
- Gaceta Oficial del Estado de Veracruz. (2005). Decreto por el que se declara Área Natural Protegida con categoría de de Reserva Ecológica, el área que conforma la Sierra de Otontepec, en el Estado de Veracruz. Tomo CLXXII. No. 43., p.p. 13-27. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v2i1.269>
- Guevara, G., Rojas, J. (2009). Efecto de las rotaciones en siembra directa sobre parámetros físicos de suelo. XX Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas. FCA.UNNE.
- Islas-López, Y., Acevedo-Sandoval, O., Cruz-Chávez, E., Prieto-García, F., Rodríguez-Laguna, R. (2014). Formas de carbono en suelos del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 1(4) 147-157 p. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192341>
- López, C. J. (2014). Influencia del cambio de uso sobre la erosión del suelo, carbono transportado por erosión y stocks de carbono en ambientes semiáridos mediterráneos. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia. 314 p. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2010.165004>
- Muñoz, C., Paulino, L., Monreal, C., Zagal, E. (2010). Greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions from soils: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 70(3) p.p. 485-497. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392010000300016>
- Mutuo, P.K., Cadisch, G., Albrecht, A., Palm, C.A., Verchot, L. (2005). Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 71, p.p. 43–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-5285-6>
- Pagiola, S., Bishop, J., and Landell-Mills, N. (2002). *Selling forest environmental services. Market-based mechanisms for conservation and development*. Earthscan, London. 320p. <https://doi.org/10.1023/b:eare.0000003723.84883.b9>
- Pagiola, S. (2008). Payments for environmental services in Costa Rica. *Ecological Economics*. 65. pp. 712–724. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033>
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T., Hunt, H.W. (2000). Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*. 48, pp. 147–163. <https://doi.org/10.1023/a:1006271331703>

- Paz, P.F., Argumedo, E.J., Cruz, G.C.O., Etchevers B.J.D., de Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana* 34, pp. 289-310. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1321>
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M.I., Jaramillo-López, P.F., y Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Vol. 19 (1) 157-173 p. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Robin, C., (1976) El vulcanismo de las planicies de la Huasteca (este de México): datos geoquímicos y petrográficos: *Boletín del Instituto de Geología*. 96, pp. 55-92
- Romero-Barrios, C., 1, García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 2(5), 63-70 pp. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i41.25>
- Santos de Lima, L., Ramos, B.P.A., Villamayor-Tomas, S., Kruegerb, T. (2019). Will PES Schemes Survive in the Long-term Without Evidence of Their Effectiveness? Exploring Four Water-related Cases in Colombia. *Ecological Economics*. 156, p.p. 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.005>
- Scharlemann, P.W.J., Tanner, V.J.E., Hiederer, R., Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), p.p. 81-91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
- Scherr, S., White, A., and Khare, A. (2004). Tropical forests provide the planet with many valuable services. Are beneficiaries prepared to pay for them? *ITTO Tropical Forest Update* 14:11-14.
- Schlesinger, W.H. (1999). Carbon Sequestration in Soils. *Science*. 284 (5423), pp. 2095. <https://doi.org/10.1126/science.284.5423.2095>
- Solís, H.A., Nájera, L.J.A., Méndez, G.J., Vargas, L.B., y Álvarez, G.M. (2014). Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. (63) 5-11 p. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2014633605>
- United States Department of Agriculture [USDA]. (1996). Soil Quality Resource Concerns: Compaction. Soil Quality Information Sheet. NRCS, USDA.

- Velázquez, A.L., Ordaz, A.A. 1994. Provincias hidrogeológicas de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 52(1-2), pp. 15-33. <https://doi.org/10.18268/bsgm1993v52n1a3>
- Walkley, A.J. and Black, I.A. (1934). An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. Soil Science. 37(1), pp 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wunder, S. (2006). The Efficiency of Payments for Environmental Services in Tropical Conservation. Conservation Biology. 21(1) pp. 48–58. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00559.x>

Copyright © 2022 Gabriela Monserrat Cancela de los Santos, Jorge Luis Chagoya-Fuentes, Rocío Rodríguez Cabrera y José Luis Alanís-Méndez.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)