

Análisis temporal del contenido de carbono orgánico del suelo en una región árida de México

Pedro Yescas-Coronado¹
Vicente P. Álvarez-Reyna¹
Miguel Ángel Segura-Castruita²
Guillermo González-Cervantes^{3§}
Mario García-Carrillo¹
Vicente Hernández-Hernández¹

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias. Unidad Laguna. Periférico y Carretera Sta. Fe, s/n. Torreón, Coahuila. (pyescas-68@hotmail.com; vdpar-190754@hotmail.com; mgc570118@hotmail.com; vhernandezhernandez@yahoo.com.mx). ²Instituto Tecnológico de Torreón-DEPI. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, ejido Anna, Torreón, Coahuila, México. CP. 27170. Tel. 01(871) 7507198. (dmilys5@hotmail.com). ³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID-RASPA). Desarrollo km 6.5 margen derecha canal Sacramento, Gómez Palacio, Durango, México.

§Autor para correspondencia: gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx.

Resumen

El contenido y comportamiento del carbono orgánico del suelo (COS) en regiones áridas; a través, del tiempo son desconocidos, aun cuando las enmiendas de estiércol bovino en estos suelos han tomado importancia en los sistemas agrícolas extensivos de esas regiones, no existe información que revele los cambios en el estatus del COS. Por tal motivo, los objetivos de esta investigación fueron establecer la distribución del contenido de COS del municipio de Matamoros, Coahuila y determinar los cambios en su concentración, través del tiempo. Muestras de suelo de la capa superficial (0-30 cm) en el año 2015, se colectaron, para estimar el contenido de COS. Estos datos y sus georreferencias se utilizaron para realizar una interpolación con el método geoestadístico Krigin Ordinario y obtener un mapa temático de distribución de COS. Asimismo, datos base de COS del año 2002, adquiridos de un trabajo previo, se emplearon para obtener otro mapa temático del municipio. Los mapas fueron comparados con una tabla de referencias cruzadas y con el índice de concordancia Kappa (ICK). Los resultados mostraron que los mapas no son iguales, como lo confirmo el ICK= 0.1, de tal manera que en trece años el COS se incrementó 65 511.88 Mg. La determinación del contenido de COS y el establecimiento de su distribución espacial, así como su comparación con datos y mapas base de COS existentes, permitieron determinar los cambios en los contenidos de COS a través del tiempo.

Palabras clave: cartografía, COS, Kappa.

Recibido: abril de 2018

Aceptado: julio de 2018

Introducción

El sistema suelo-vegetación juega un papel importante en el aumento o la reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, ya que depende de la velocidad de formación y descomposición del carbono orgánico en el suelo (Singh *et al.*, 2007), razón por la cual, el recurso suelo es uno de los reservorios terrestres de carbono (C) más grandes del planeta (Steffen *et al.*, 2007). No obstante, ante el incremento de la cantidad de CO₂ en la atmósfera y la recomendación que se planteó en el Protocolo de Kyoto del Intergovernmental Panel on Climate Change, se ha extendido el interés en la dinámica del carbono orgánico del suelo (COS) en el mundo, buscándose alternativas para su captura (IPCC, 2006). En este sentido, para estimar el potencial de captura de C en el suelo bajo distintos escenarios, es necesario distinguir dos cuestiones: a) ¿cuál es la existencia original de carbono en el suelo? y b) ¿cuáles son los cambios en la existencia del mismo? (Batjes, 1999).

Los datos base de un lugar determinado, sirven para la evaluación del contenido de COS en regiones áridas y semiáridas (Luo *et al.*, 2011). El elemento C juega un papel importante, directa o indirectamente en el comportamiento del suelo (Lal *et al.*, 2004) ya que constituye una parte esencial de los residuos de cosecha o de vegetales, además forma parte de compuestos minerales como los carbonatos, que influyen en la estabilidad de los agregados en el suelo (Holland, 2004). El método que comúnmente se aplica para conocer el contenido de C es la determinación del COS a diferentes profundidades o globalmente, para uno o más horizontes y posteriormente, los datos se transforman tomando en cuenta la densidad aparente (Da) y la pedregosidad del suelo (Eller *et al.*, 2006). Una de las alternativas que se han utilizado para conocer el COS, es el análisis de datos de perfiles de suelos con el uso de sistemas de información geográficos (SIG), para generalizar la información; a través, de métodos de interpolación estadísticos o geoestadísticos; sin embargo, han faltado datos bien referenciados (FAO, 2002).

Al respecto, los suelos de México tienen en promedio 1.8% de CO, lo que representa un contenido total de 10.5 Pg de COS en la capa superficial (de 0 a 20 cm de profundidad), donde las menores contribuciones se encuentran en las regiones áridas, mientras que, por uso del suelo, la agricultura de riego mostró el menor contenido de COS (Segura-Castruita *et al.*, 2005). Asimismo, en trabajos recientes, se han reportado un total de COS de 8.46, 8.54 y 8.578 Pg, respectivamente, después de analizar datos de perfiles de suelo de México (21 196 perfiles) con el fin de asignar COS a polígonos de las cartas vectoriales de uso de suelo y vegetación (USV) de las series II, III y IV del INEGI (Paz-Pellat *et al.*, 2012). Aunque, Cruz y Paz (2013) al asignar valores de COS a polígonos de USV de la serie IV, reportaron una cantidad global de C para México de 9.14 Pg. No obstante, aun cuando se cuenta con información nacional, y principalmente de regiones templadas y tropicales (Segura-Castruita *et al.*, 2005), las regiones áridas y semiáridas han sido menos estudiadas; aunque, Montañaño *et al.* (2016) revelaron generalidades acerca de, cómo su alta heterogeneidad espacio-temporal afecta los almacenes y flujos del C.

Sin embargo, información relacionada con los cambios en los contenidos de carbono orgánico después de años de aplicación de enmiendas orgánicas a los suelos agrícolas de estas regiones, es escasa. Por ejemplo, algunos suelos del área agrícola del distrito de riego 017, que se encuentra en la Comarca Lagunera entre los estados de Coahuila y Durango, reciben año con año en función del sistema de producción, enmiendas orgánicas que varían de 80 a 120 t ha⁻¹ (Fortis-Hernández *et al.*,

2009). Sin embargo, no existe información acerca del estatus de la concentración del COS en los suelos, ya que la única fuente de información existente, tiene más de diez años de haberse generado (Segura-Castruita *et al.*, 2005). Al considerar lo anterior, es probable que al conocer el estatus del COS, así como su distribución espacial y compararlos con información base existente, se determinen los cambios en los contenidos de COS; a través, del tiempo en la Región Lagunera. Por tal motivo, los objetivos de esta investigación fueron establecer la distribución del contenido de COS del municipio de Matamoras, Coahuila y determinar los cambios en su concentración través del tiempo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo se llevó a cabo en el municipio de Matamoras (superficie de 80 799.21 ha), Coahuila; entre los paralelos 25° 23' y 25° 48' norte y los meridianos 103° 03' y 103° 23' oeste (Figura 1), a una altitud de 1 120 m. La zona se caracteriza por presentar un clima muy seco o desértico, semi cálido con lluvias en verano e invierno fresco con oscilación extremosa, cuya precipitación total anual es de 250 mm y evaporaciones total anual promedio que alcanzan los 2 500 mm (García, 2004). Los elementos geológicos pertenecen a los periodos cuaternario y cretácico, compuestos de sedimentos aluviales y eólicos, calizas yeso y conglomerados. Por otra parte, de acuerdo con INEGI (2016), se han identificado seis grupos de suelos (Regosoles, Cambisoles, Calcisoles, Leptosoles, Fluvisoles y Vertisoles) siendo su uso principalmente agrícola, con vegetación de matorrales, pastizales y zonas urbanas (INEGI, 2010).

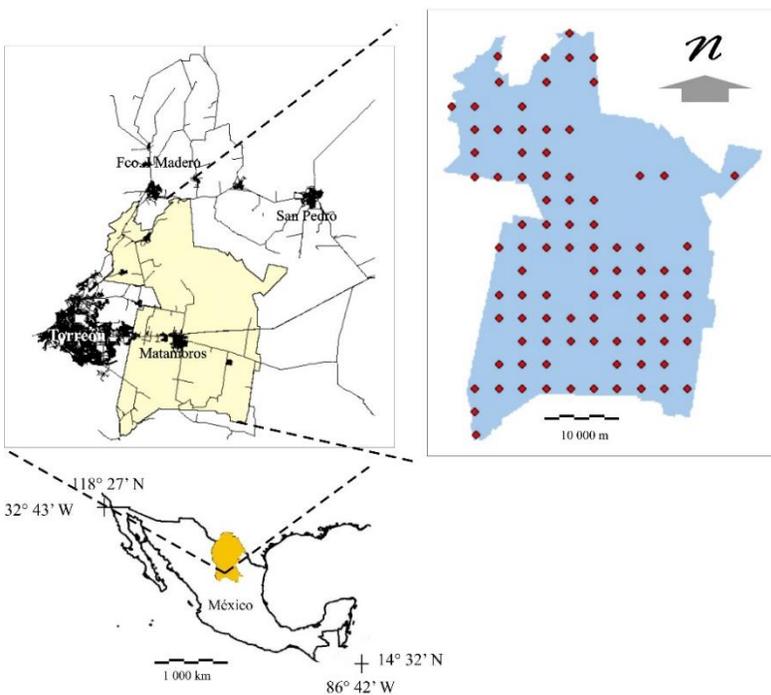


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de sitios de muestreo.

El trabajo se dividió en cuatro etapas como se describen a continuación:

Selección de sitio y muestreo de suelos. Muestras de la capa superficial (0-30 cm) de diferentes suelos (dos kilogramos aproximadamente) se colectaron en el municipio de Matamoros, Coahuila. Los suelos correspondieron a sitios que se seleccionaron al sobreponer una cuadrícula de 2.5 x 2.5 km en el polígono del área de estudio (Figura 1), donde los vértices de la cuadrícula correspondieron a sitios potenciales de muestreo, cuyas coordenadas geográficas se registraron para posteriormente acudir a campo, como lo indicaron Segura-Castruita *et al.* (2005). No obstante, en la elección final de los sitios, se tomó como criterio la accesibilidad de los lugares (carreteras pavimentadas, terracerías y brechas), utilizando las cartas topográficas del INEGI (2016). Cada sitio fue georreferenciado con un GPS marca Garmin Etrex. Posteriormente con los datos de localización y diferentes características de los suelos se generó una base de datos. Asimismo, se realizó una entrevista a los productores dueños de las parcelas o lugares donde se ubicaron los sitios de muestreo.

Obtención del carbono orgánico y la densidad aparente. La densidad aparente (D_a) se obtuvo por el método de la parafina; mientras que el porcentaje de carbono orgánico (CO) del suelo se determinó por el método de combustión húmeda de Walkley y Black (1934), como se establece en la Norma Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

El cálculo del COS y su variación en la región se obtuvo con el método de la masa equivalente (cálculo de COS almacenado en una masa de suelo de referencia), tomando en consideración el efecto del cambio en la D_a sobre el carbono del suelo almacenado, con la ecuación (1) propuesta por (Eller *et al.*, 2006).

$$SCD_i = SC_i \times BD_i \times H_i \times 1000 \times (1 - \eta_i / 100)$$

Donde: SCD_i representa al almacén de COS en la capa i (SCD_i en $Mg\ ha^{-1}$ de C); SC_i representa el contenido de COS_i ($g\ kg^{-1}$) en la capa i ; BD_i es la densidad aparente ($g\ cm^{-3}$) en la capa i ; y el H_i es el espesor (cm) de la capa i . El término η_i representa el porcentaje de las partículas con un tamaño >2 mm en la capa i . Se reportará para la capa superficial (0-30 cm).

Distribución espacial de COS y comparación. La distribución espacial de las concentraciones de COS se obtuvo al realizar una interpolación con el método geoestadístico Kriging Ordinario (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2010) en el software ArcGIS 10.3[®], donde se aplicó la ecuación (2).

$$Z_{(s)} = \mu_{(s)} + \varepsilon_{(s)}$$

Donde: $Z_{(s)}$ es la variable de interés (COS); $\mu_{(s)}$ es la tendencia determinante y aleatoria en la que se encuentra la variable de interés (COS); $\varepsilon_{(s)}$ es el error autocorrelacionado; y s indica la localización. Esta interpolación fue útil para la obtención del mapa temático de carbono orgánico de la capa superficial de los suelos de Matamoros, para el año 2015.

Para analizar los contenidos de COS del mapa que se obtuvo en este trabajo y su comportamiento en el tiempo, se utilizaron los datos de porcentaje de CO y D_a de los puntos que obtuvieron Segura-Castruita *et al.* (2005) y se calculó nuevamente el COS con la ecuación 1, es importante aclarar

que no se utilizaron los valores del mapa que estos autores reportaron, puesto que la interpolación la realizaron con el interpolador Inverso de la distancia (IDW), razón por la cual para llevar a una igualdad de condiciones, se realizó de nuevo la interpolación de los contenidos de COS del 2002 con el método Kriging Ordinario como se realizó para los datos del año 2015.

La comparación de los dos mapas temáticos se realizó con una tabla de validación cruzada, para lo cual se utilizó el módulo CROSSTAB del software Idrisi Selva; asimismo, se obtuvo el índice de concordancia Kappa (ICK) entre los dos mapas (Landis y Koch, 1977).

Resultados y discusión

Características de los suelos

Las muestras de suelo de la capa superficial que se colectaron en el municipio de Matamoros fueron 92, puesto que algunos lugares no se permitía el acceso o estaban pavimentados. La Da de estos suelos varió de 1.03 a 1.57 g cm⁻³ (Cuadro 1). Los suelos se usan con fines agrícolas, urbano y sin uso aparente. Los suelos agrícolas tienen cultivos de alfalfa, algodón, frijol, maíz forrajero, nogal y hortalizas, algunas de uso intensivo con dos cultivos anuales (monocultivos o intercalaciones), otras con un cultivo anual (ciclo primavera-verano) y semiperennes o perennes. Estas áreas son de riego que puede ser irrigadas con sistema por gravedad o con agua de pozo profundo. Asimismo, algunos suelos reciben enmiendas orgánicas de estiércol y otros no. De tal manera, que los porcentajes de carbono orgánico de los suelos variaron 0.15 a 2.16% (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los contenidos de carbono, densidad aparente y pH.

Variable	N*	\bar{x}	σ	$\bar{x} \pm \sigma$	CV	Mínimo	Máximo
CO (%)	92	1.15	0.57	(0.58 - 1.72)	46.63	0.15	2.16
Da (g cm ⁻³)	92	1.25	0.09	(1.16 - 1.34)	7.43	1.03	1.57
COS (Mg ha ⁻¹)	92	4.27	2.01	(2.26 - 6.28)	47.66	0.58	7.98

*N= número de muestras; \bar{x} = promedio; σ = desviación estándar; $\bar{x} \pm \sigma$: promedio más menos desviación estándar.

La Da del área de estudio, correspondió a suelos con texturas de arcilla a arena, no compactados (Porta *et al.*, 2010) que de acuerdo con Heuscher *et al.* (2005), se presentan generalmente en suelos con porcentajes bajos de CO. Situación que podría estar relacionado con el tipo de vegetación que soportan los suelos, que se compone de matorral xerófilo y rosetófilo (INEGI, 2010). Montañaño *et al.* (2016), indicaron que este tipo de vegetación es común en climas que prevalecen en zonas áridas y semiáridas, e influyen en el aporte de carbono al suelo, así como por las actividades agrícolas intensivas que influyen en los contenidos de CO (Becerra *et al.*, 2014).

Carbono orgánico de los suelos en 2015

La capa superficial (0-30 cm) de los suelos del municipio de Matamoros en 2015 presentaron COS con una variación de 2.48 a 5.63 Mg ha⁻¹, donde los mayores contenidos se encontraron en la parte noroeste y central en un sentido noroeste-sureste del municipio, que se agruparon en las clases >4.5 y 3.5-4.5 Mg ha⁻¹, respectivamente; mientras que menores contenidos se encuentran al noreste entre los cerros de Matamoros y la parte sur del municipio (Figura 2).

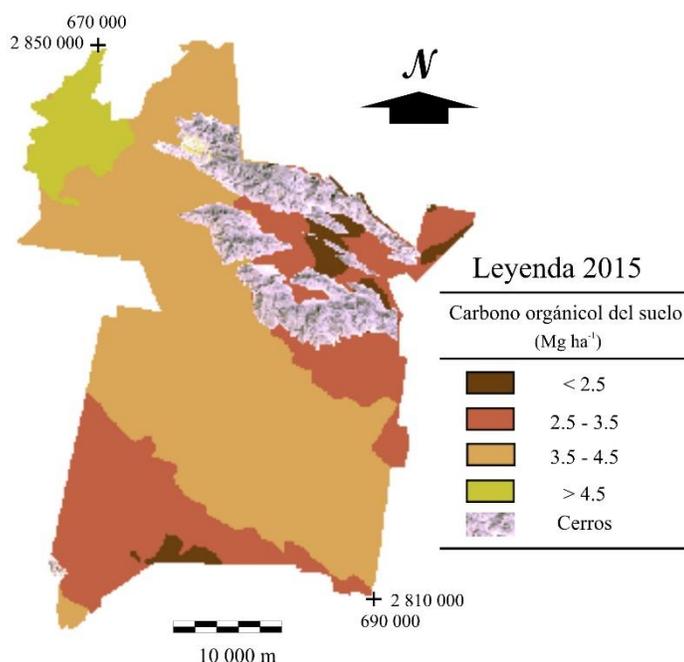


Figura 2. Distribución espacial de los contenidos de carbono orgánico de los suelos del municipio de Matamoros, Coahuila.

Por otra parte, la clase 3.5-4.5 Mg ha⁻¹ ocupó la mayor superficie (46 266.66 ha) en tanto que la menor superficie la ocuparon los suelos con <2.5 Mg ha⁻¹ con 4 493. 45 ha (Cuadro 2). Los contenidos de COS en el municipio son bajos en comparación del rango de contenidos de COS (2.1 a 72 Mg ha⁻¹) que se han reportado para otras regiones áridas de México y el mundo (Díaz-Hernández *et al.*, 2003; Elbasiouny *et al.*, 2014; Montañó *et al.*, 2016). En este sentido, la acumulación de COS está relacionada al tipo de vegetación y a las características climáticas como el índice de precipitación anual (Bui *et al.*, 2009) e incluso al manejo de los suelos (Lents y Lersch, 2014). Sin embargo, hasta aquí no se puede establecer cuál ha sido la magnitud de cambio respecto al pasado de estos suelos.

Cuadro 2. Modificaciones en los contenidos de carbono orgánico de 2002 a 2015 en Matamoros, Coahuila.

Clase (Mg ha ⁻¹)	COS 2015	
	Área (ha)	Contenido (Mg)
< 2.5	4 128.84	10 322.1
2.5 - 3.5	25 920.38	77 761.14
3.5 - 4.5	46 257.55	185 030.2
> 4.5	4 492.44	20 215.98
Total	80 799.21	293 329.42

El mapa temático que se obtuvo a partir de los datos de COS de 2002 y las georreferencias que reportaron Segura-Castruita *et al.* (2005), es diferente (Figura 3) al que se obtuvo para 2015, ya que para 2002 solo se lograron establecer dos clases de contenidos. La clase 3.5 - 4.5 Mg ha⁻¹, tuvo la mayor superficie (51 639.49 ha) lo que representaba alrededor de 154 919.54 Mg, mientras que la clase 2.5 - 3.5 Mg ha⁻¹ ocupó un área de 29 159.22 ha, que tenían un contenido de 72 898.05 Mg, aproximadamente; haciendo un total de 227 817.54 Mg para la capa superficial de los suelos de Matamoros. La distribución espacial de los mayores contenidos se encontró en la parte central del municipio. Este contenido es menor que el que se obtuvo en nuestra investigación (293 329.42 Mg), lo que significa que en trece años el COS se incrementó 65 511.88 Mg.

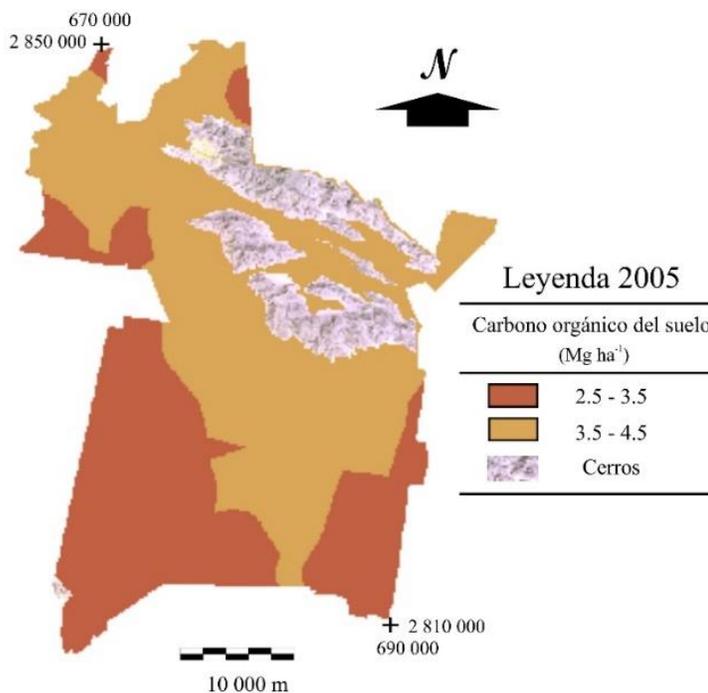


Figura 3. Distribución de los contenidos de carbono orgánico del suelo de la capa superficial de Matamoros, Coahuila (adaptado de Segura *et al.*, 2005).

Al comparar los mapas de contenido de COS del año 2002 y 2015, gráficamente se puede observar que son diferentes, como se constató con el ICK (0.1) que indica que los mapas tienen una concordancia muy baja. Así, en el mapa 2002 aparecen dos clases de contenido, mientras que en 2015 se detectaron cuatro. Las diferencias reflejaron cambios entre el COS de los dos mapas, que se pudieron establecer cuando se realizó la tabulación cruzada, donde algunas áreas se incrementaron y otras disminuyeron (Figura 4).

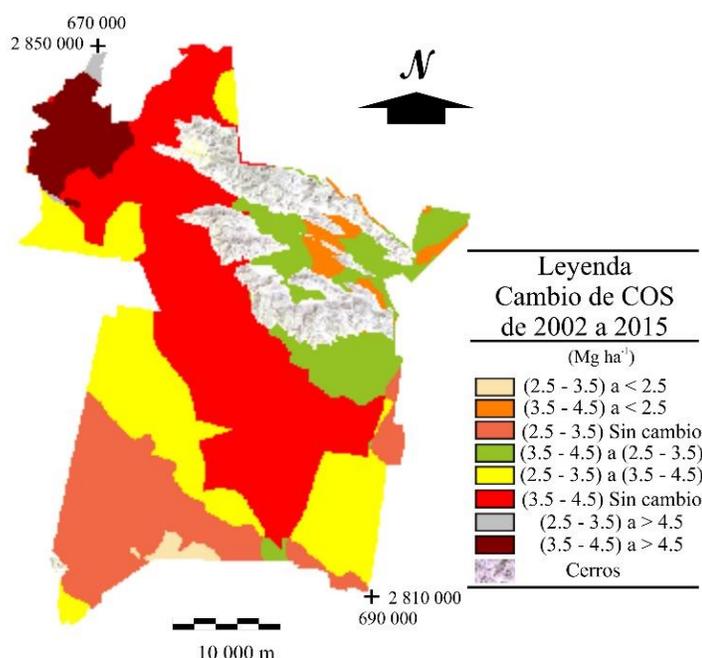


Figura 4. Mapa de cambios de los contenidos de carbono orgánico del suelo entre los años 2002 y 2015, en el municipio de Matamoros, Coahuila.

La magnitud de los cambios en superficie de las clases de COS fue diferente en toda el área de estudio de tal manera que, los contenidos de COS en la superficie que ocupaba la clase 2.5 a 3.5 Mg ha⁻¹ en el año 2002 disminuyeron para 2015, tanto en forma negativa como positiva; es decir, en parte de esta superficie los contenidos se redujeron a <2.5 Mg ha⁻¹, apareciendo una superficie de 662.55 ha que en 2002 no existía (Cuadro 3).

Cuadro 3. Áreas de cambio de los contenidos de carbono orgánico del 2002 y 2015 en el municipio de Matamoros, Coahuila.

	Clase (Mg ha ⁻¹)	Mapa COS 2002 (ha)		Total (ha)
		2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	
Mapa COS 2015 (ha)	< 2.5	662.55	3 466.29	4 128.84
	2.5 - 3.5	12 580.43	13 339.95	25 920.38
	3.5 - 4.5	15 650.81	30 606.74	46 257.55
	> 4.5	258.56	4 233.88	4 492.44
	Total (ha)	29 152.35	51 646.86	80 799.21

En cambio, parte de la superficie que ocupaba la clase 2.5 a 3.5 Mg ha⁻¹, también se contrajo porque los contenidos se incrementaron, tanto a la siguiente clase superior (3.5 a 4.5 Mg ha⁻¹) como en la >4.5 Mg ha⁻¹ (15 650.81 y 258.56 ha, respectivamente). Situación que también ocurrió en la clase 3.5 - 4.5 Mg ha⁻¹ del mapa 2002, aunque los cambios fueron más grandes. De tal forma que, en 2015 se detectó un área de 4 128.84 ha con contenidos de COS <2.5 Mg ha⁻¹, que no existía en 2002, en general el COS se incrementó en la capa superficial de los suelos del municipio.

Estos resultados tienen relación con lo que se observó durante los recorridos de campo para el muestreo. Las áreas agrícolas se dividían en dos, áreas que correspondían al ejido y áreas de pequeña propiedad. Algunos suelos de pequeña propiedad recibían enmiendas de estiércol y otros no, además tenían manejo diferente al soportar diversos cultivos, aunque el principal era maíz forrajero. Por otra parte, la vegetación que se observó en las áreas no cultivadas, consistía de matorrales como gobernadora, árboles de mezquite y huizache, pastos y órganos. En este sentido, Fortis-Hernández *et al.* (2009) indicaron que el aporte de estiércol al suelo agrícola en la Región Lagunera es una práctica común en algunas pequeñas propiedades, llegando a aplicar hasta 120 t ha⁻¹ de estiércol.

Al respecto, la adición de estiércol aumenta el almacenamiento de carbono a corto plazo (Lents y Lersch, 2014). Sin embargo, Flores-Sánchez *et al.* (2015) indicaron que el manejo tradicional de los suelos provoca una mínima acumulación de CO en los suelos; ya que la labranza puede provocar la pérdida de las reservas de COS (Olson, 2013). Asimismo, el clima árido y la vegetación de la región también influyen en los contenidos de COS en aquellas áreas que no son tierras de cultivo (Montaño *et al.*, 2016).

Lo anterior, permite deducir que las aplicaciones de enmiendas orgánicas estarían incrementando las reservas de COS en los suelos de Matamoros, pero a su vez los sistemas de labranza convencionales no permitirían la acumulación de una mayor cantidad; asimismo, en aquellos lugares donde no se realizan estas prácticas orgánicas, las reservas de carbono podrían perderse rápidamente por efecto de la labranza y la apertura de nuevas áreas al cultivo.

Conclusiones

Los mayores contenidos de COS de la capa superficial (>4.5 Mg ha⁻¹) de los suelos de Matamoros, Coahuila se ubicaron al noreste del municipio, y se relacionaron con enmiendas de estiércol que se aplican a los suelos agrícolas de pequeñas propiedades, mientras que los menores contenidos (<2.5 Mg ha⁻¹) se ubicaron al sur del municipio, donde los suelos agrícolas no contaban con aplicaciones de materiales orgánicos y eran ejidales. Asimismo, al considerar información base de COS del año 2002, se determinó que los contenidos de COS para 2015 se incrementaron 65 511.88 Mg. Por lo tanto, la determinación del contenido de COS, y el establecimiento de su distribución espacial, así como su comparación con datos y mapas base de COS existente, permiten determinar los cambios en los contenidos de COS a través del tiempo. Los cambios que se encontraron en este trabajo fueron positivos y negativos, por efecto del clima y la vegetación en áreas naturales, así como por la labranza tradicional y el manejo de los suelos agrícolas, donde algunos reciben enmiendas orgánicas y otras no. Sin embargo, aun cuando esto se pudo observar, se requiere de mayor investigación en relación a los cambios que provoca la labranza en aquellos lugares donde se aplican estiércoles, para hacer eficiente este manejo.

Literatura citada

Batjes, N. H. 1999. Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands. 200 p.

- Becerril, P. R.; González, S. E.; Mastachi, L. C. A.; Díaz, D. C. y Ramos, S. N. M. 2014. Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosist. Rec. Agropec.* 1(1):9-18.
- Bui, E.; Henderson, B.; and Viergever, K. 2009. Using knowledge discovery with data mining from the Australian Soil Resource Information System database to inform soil carbon mapping in Australia. *Global Biogeochem. Cycles.* 23(4):1-15.
- Cruz, C. y Paz, F. 2013. Mapa de carbono orgánico de los suelos de la República Mexicana. *In:* Paz, F.; Bazan, M. y Saynes, V. (Eds.). *Dinámica del carbono en el suelo 2012. Serie Avances Temáticos del Ciclo del Carbono y sus Interacciones.* Programa mexicano del carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo. Texcoco, Estado de México, México. 187-191 pp.
- Cruz, C. G.; Ortiz, S. C. A.; Ojeda, T. E.; Martínez, M. J. F.; Sotelo, R. E. D. and Licona, V. A. L. 2010. Evaluation of four digital classifiers for automated cartography of local soil classes based on reflectance and elevation in Mexico. *Inter. J. Remote Sensing.* 31(3): 665-679.
- Díaz, H. J. L.; Barahona, F. E. and Linares, G. J. 2003. Organic and inorganic carbon in soils of semiarid regions: a case study from the Guadix–Baza basin (Southeast Spain). *Geoderma.* 114(1):65-80.
- Elbasiouny, H.; Abowaly, M.; Alkheirb, A. A. and Gad, A. A. 2014. Spatial variation of soil carbon and nitrogen pools by using ordinary Kriging method in an area of north Nile Delta, Egypt. *Catena.* 113:70-78.
- Ellert, B. H.; Janzen, H. H.; VandenBygaart, A. J. and Bremer, E. 2006. Measuring change in soil organic carbon storage. *In:* Carter, M. R. and Gregorich, E. G. (Eds.). *Soil Sampling and Methods of Analysis.* CRC Press, Boca Raton, FL. 25-38 pp.
- FAO. 2002. Food and Agricultural Organization. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. *Informes sobre recursos mundiales de suelos. Reporte 96.* Roma, Italia. 9-15 pp.
- Flores, S. B.; Segura, C. M. A.; Fortis, H. M.; Martínez, C. L.; Aldaco, N. R. A. y Orozco, V. J. A. 2015. Enmiendas de estiércol solarizado en la estabilidad de agregados de un Aridisol cultivado de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(7):1543-1555.
- Fortis, H. M.; Leos, R. J. A.; Orona, C. I.; García, H. J. L.; Salazar, S. E.; Preciado, R. P.; Orozco, V. J. A.; Segura, C. M. A. 2009. Uso de estiércol en la Comarca Lagunera. *In:* Orona, C. I.; Salazar, S. E.; Fortis, H. M.; Trejo, E. H. I. and Vázquez, V. C. (Eds.). *Libro de agricultura orgánica.* FAZ-UJED. Gómez Palacio, Durango. México, 104-127 pp.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Quinta edición. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, DF. 98 p.
- Heuscher, S. A.; Brandt, C. C. and Philip, M. J. 2005. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(1):51-56.
- Holland, J. M. 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103(1):1-25.
- IPCC. 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Kanagawa, Japan.
- INEGI. 2016a. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Sistema de descarga de productos digitales. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/>.
- INEGI. 2016b. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Sistema de descarga de productos digitales. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/topografico/>.

- INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática. Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1:250,000. Serie IV. DGG-INEGI, México.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 304(5677):1623-1627.
- Landis, J. R. and Koch, G. G. 1977. An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*. 33(2):363-374.
- Lentz, R. D. and Lehrs, G. A. 2014. Manure and fertilizer effects on carbon balance and organic and inorganic carbon losses for an irrigated cornfield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78(3):987-1002.
- Luo, Y.; Durenkamp, M.; De Nobili, M.; Lin, Q. and Brookes, P. C. 2011. Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH. *Soil Biol. Biochem.* 43(11):2304-2314.
- Montaño, N. M.; Ayala, F.; Bullock, S. H.; Briones, O.; García O., F.; García S., R.; Maya, Y.; Perroni, Y.; Siebe, C.; Tapia T., Y.; Troyo, E. y Yépez, E. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoam.* 34(1):39-59.
- Olson, K. R. 2013. Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in US croplands: issues paper for protocol development. *Geoderma*. 201-206 pp.
- Paz, P. F.; Hidalgo, M. C. y Etchever, B. J. 2012. Análisis y modelación de las energías de dispersión en la distribución del carbono orgánico en los suelos por fracciones físicas. *In: Paz, F. y Cuevas, R. (Eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México. Síntesis a 2011. Serie síntesis nacionales. Programa mexicano del carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México. 240-247 pp.*
- Porta, C. J.; López, A. M. y Poch, C. R. M.; 2014. Introducción a la edafología: uso y protección del suelo. 3ª (Ed.). Mundi- Prensa. México, DF. 607 p.
- Segura, C. M. A.; Sánchez, G. P.; Ortiz, S. C. A. y Gutiérrez, C. M. C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoam.* 23(1):21-28.
- SEMARNAT. 2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudios, muestreos y análisis. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. Talleres Gráficos de México. México, DF. Tomo DLXV-12: 6-74 pp.
- Singh, S. K.; Singh, A. K.; Sharma, B. K. and Tarafdar, J. C. 2007. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India. *J. Arid Environ.* 68(3):408-421.
- Steffen, W.; Crutzen, P. J. and McNeill, J. R. 2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *AMBIO. A. J. Human Environ.* 36(8):614-621.
- Walkley, A. and Black, C. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1):29-38.