

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL CARBONO ORGÁNICO E
INORGÁNICO EN SUELOS DE LA COMARCA LAGUNERA DE COAHUILA.

Tesis

Que presenta PEDRO YESCAS CORONADO
como requisito parcial para obtener
el Grado de DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

Torreón, Coahuila

Enero 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL CARBONO ORGÁNICO E
INORGÁNICO EN SUELOS DE LA COMARCA LAGUNERA DE COAHUILA.

Tesis

Que presenta PEDRO YESCAS CORONADO
Como requisito parcial para obtener
el Grado de DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

Dr. Vicente De Paul Álvarez Reyna
Director UAAAN

Dr. Miguel Ángel Segura Castruita
Director Externo DEPI-ITT

Torreón, Coahuila

Enero 2018

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL CARBONO ORGÁNICO E
INORGÁNICO EN SUELOS DE LA COMARCA LAGUNERA DE COAHUILA.

Tesis


Elaborada por PEDRO YESCAS CORONADO como requisito parcial para
obtener el grado de Doctor en Ciencias Agrarias con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría

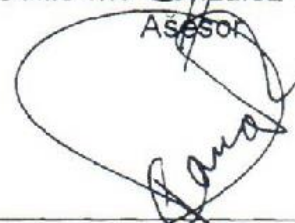

Dr. Vicente De Paul Álvarez Reyna
Asesor Principal

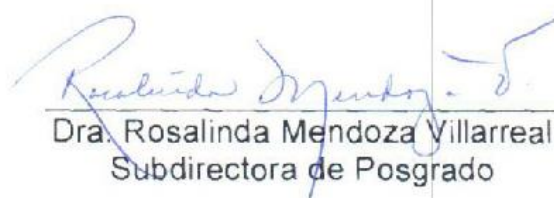

Dr. Vicente Hernández Hernández
Asesor


Dr. Mario García Carrillo
Asesor


Dr. Guillermo González Cervantes
Asesor


Dr. Miguel Ángel Segura Castruita
Asesor


Dr. Pedro Cano Ríos
Jefe del Departamento de Postgrado


Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Subdirectora de Posgrado

Agradecimientos

A mi Alma Mater por formarme y darme las bases para el éxito en el paso por esta vida, por apoyar cada día los estudios de posgrado.

A mi comité de Asesoría Dr. Vicente de Paul Álvarez Reyna, Dr. Miguel Ángel Segura Castruita, Dr. Guillermo González Cervantes, Dr. Mario García Carrillo y Dr. Vicente Hernández Hernández, por aceptar y apoyar este proyecto dándome la oportunidad de hacerlo realidad.

A mis maestros Doctorados: Pedro Cano Ríos, Héctor Mario Quiroga, Ángel Lagarda Murrieta, Vicente De Paul Álvarez Reyna, Mario García Carrillo, Vicente Hernández Hernández, Ogaz y Cantú Brito por compartir su sapiencia conmigo.

A mis compañeros: Limber, Mauricio, Héctor, Isaías, y Jessy por coincidir en esta etapa de mi vida.

Al personal del Departamento de Posgrado en especial a **Esther**, por todo el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

Un agradecimiento especial al Instituto tecnológico de Torreón por brindar su apoyo con el Laboratorio de suelos y por las facilidades brindadas para la realización de los análisis de muestras.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Miguel Ángel Segura Castruita, codirector en este proyecto, por sus consejos y enseñanzas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado en forma de beca a lo largo de 3 años, para la culminación de este proyecto.

Dedicatorias

A mis padres **Rosalio Yescas Valles y Ma de la Luz Coronado Mendoza** a quienes les debo la vida.

A mis hermanos **Pablo, Felipe, Carlos, Antonio, Josefina y Román**, quienes han sido testigos de mis logros y tropiezos a lo largo de mi vida.

A mi esposa **Ma Adriana**, quien siempre estuvo conmigo.

A mis hijos **David, Denis Javier y Pablo Antonio** quienes son la razón de mi existencia, por quienes vivo, trabajo y trato de superarme constantemente.

Cartas de aceptación de los artículos

De: Antoni Camprubí i Cano <camprubitag@gmail.com>

Enviado: miércoles, 15 de noviembre de 2017 04:22 p. m.

Para: Miguel Angel Segura Castruita

Asunto: Re: manuscrito enviado al Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

Estimado colega

En opinión de nuestro editor a cargo, el manuscrito es aceptable para la revista en su forma actual. Por favor, envíen a esta dirección de nuevo el manuscrito con archivos por separado del texto, tablas y figuras a una resolución mínima de 300 dpi a fin de iniciar el proceso de edición técnica.

Saludos cordiales,

AC

Texcoco, Estado de México, 21 de junio de 2017
Núm. Ref.: 394-17

Dr. Guillermo González Cervantes
INIFAP CENID-RASPA
Presente

Por este medio le agradezco y acuso de recibido su manuscrito intitulado “Análisis temporal del contenido de carbono orgánico del suelo en una región árida de México” cuyos autores (as) son Pedro Yescas Coronado, Vicente P. Álvarez Reyna, Miguel Angel Segura Castruita, Guillermo González Cervantes, Mario García Carrillo y Vicente Hernández Hernández que fue enviado para su posible publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Le notificamos que el texto inicial del manuscrito, autores(as) principal y los coautores(as), autor(a) para correspondencia no podrán alterarse y quedarán como se envía en esta versión.

Asimismo, me permito informarle que su contribución será sometida a revisión técnica por los árbitros que se designen en caso de ser aceptado, se le notificará sobre las observaciones correspondientes. Agradezco su colaboración y le envío un cordial saludo.

Atentamente



DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

INTRODUCCIÓN

El recurso suelo es el reservorio terrestre de carbono (C) más grandes del planeta, ya que contiene más C que la vegetación y la atmósfera (Martínez *et al.*, 2008); además, juega un rol importante en el aumento o reducción de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, en función de la velocidad de formación y descomposición del carbono orgánico en el suelo (COS) (West y Marland, 2002), y de los cambios en el estatus del carbono inorgánico (CIS) (Singh *et al.*, 2007). La escala para medir carbono en el suelo puede ser a nivel parcela, cuenca, región, un país en específico, un continente o una zona agroecológica (FAO/IIASA, 1999).

El análisis de datos de perfiles de suelos mediante sistemas de información geográficos (SIG), es una alternativa para conocer la distribución de los contenidos de COS, mismo que pueden utilizarse para el CIS, con el fin de generalizar la información. No obstante, faltan datos bien referenciados (FAO, 2002), así como del uso de técnicas geoestadísticas que fusionen diferentes fuentes de información como el conocimiento de la dinámica del COS y el efecto de escala, para mejorar las estimaciones espaciales (Paz-Pellat *et al.*, 2016).

En este sentido, México cuenta con algunos estudios a nivel nacional donde se muestra la distribución espacial del contenido de COS a nivel país (Segura-Castruita *et al.*, 2005; Etchevers *et al.*, 2006; Paz-Pellat *et al.*, 2012; Cruz y Paz, 2013). No obstante, Batjes (1999) indicó que, para estimar el potencial de captura de carbono en el suelo bajo distintos escenarios, es necesario saber cuál es la existencia original de carbono en el suelo y cuáles son las modificaciones en la existencia del mismo, pues no se tiene certidumbre acerca de los cambios si no se cuenta con datos base que sirvan de comparación en evaluaciones del contenido de COS en un sitio o lugar determinado, ni del CIS en regiones áridas y semiáridas (Luo *et al.*, 2011). Asimismo, Paz-Pellat *et al.* (2016) en su análisis de la distribución espacial y temporal de las concentraciones de COS, concluyeron que independientemente de la metodología utilizada y sus bases de

datos, las estimaciones realizadas tienen el defecto que no pueden validarse al no utilizar modelos predictivos.

Además, 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. Al respecto, Montaña *et al.* (2016) mencionaron cómo la alta heterogeneidad espacio-temporal de estas regiones y las condiciones ambientales, la comunidad vegetal y el uso del suelo, afectan los almacenes y flujos del C. Sin embargo, información relacionada con el estatus de la concentración del CIS y su cartografía es escasa (Segura-Castruita *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2006), al igual que el comportamiento de su variabilidad espacial. Conocimiento que resulta importante, ya que la aplicación de enmiendas orgánicas se ha convertido en una práctica común en áreas con agricultura intensiva en los distritos de riego de regiones áridas y semiáridas de México. Por ejemplo, los suelos de cultivo del distrito de riego 017 en la Comarca Lagunera, se aplican año con año enmiendas orgánicas que varían de 80 a 120 Mg ha⁻¹ (Fortis *et al.*, 2009), pero el efecto de estas aplicaciones en el contenido y comportamiento espacial del COS y CIS es desconocido. Al considerar lo anterior, si el conocimiento del estatus y distribución espacial del COS y CIS, se logra establecer con datos georreferenciados de muestras de suelo y la aplicación de métodos geoestadísticos para generar modelos predictivos, así como su relación con las características climáticas y uso del suelo, entonces podría explicarse el comportamiento de los contenidos y distribución de COS y CIS en la capa superficial función de su variabilidad espacial en la Región Lagunera. De tal manera que, los objetivos de este trabajo fueron determinar los contenidos de carbono orgánico e inorgánico en suelos agrícolas de una región árida de México, establecer su distribución y variabilidad espacial mediante un método geoestadístico y verificar la precisión de los mapas temáticos de COS y CIS.

REVISION DE LITERATURA

El secuestro de C en los suelos agrícolas ha sido reconocido como una herramienta potencial en la mitigación del cambio climático (IPPC, 2007). La sensibilidad del almacén de C a los factores ambientales como el clima y las características del suelo (como su textura, profundidad y fertilidad) influyen en los esfuerzos por incrementar el inventario de C, tanto como las prácticas de manejo ligero que pueden incrementar el secuestro de C (Blanco y Lal, 2008).

El secuestro de C en el suelo ocurre cuando entra C de la biomasa o enmiendas orgánicas ricas en carbono, mismas que son superiores a las pérdidas de C a través de la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos o es removida por efectos de erosión (Sherrod et al., 2005).

Elementos climáticos como la precipitación, la temperatura y la evaporación, influyen en los contenidos de agua y nutrientes del suelo, ellos determinan la cantidad de biomasa que se desarrolla en el lugar (Blanco y Lal, 2008; Conant et al., 2011) y la actividad de los microorganismos del suelo (Six et al., 2002).

También, la masa de C almacenado en el perfil del suelo, es influenciada por la naturaleza del suelo y el clima; mientras que los factores externos como el manejo, inmediatamente ejercen control sobre estos, lo cual significa que no todas las tierras agrícolas tienen el mismo potencial a incrementar las reservas de carbono (Orgill et al., 2014).

Los cambios en el COS son responsables de las variaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, además de la productividad de cultivos y la fertilidad del suelo (Maia et al., 2010), así como también de los ciclos de carbono regional y/o global (Post y Kwon, 2000). El secuestro de C es por lo tanto de gran importancia en la investigación del ciclo del carbono. El entendimiento de la variabilidad espacial del COS y los factores primarios que influyen en ello, son esenciales para la evaluación del funcionamiento del suelo y entendimiento de los procesos del secuestro de carbono en el suelo (Li y Shao et al., 2014).

El COS es controlado por varios factores naturales y antropogénicos; por ejemplo, los cambios de clima influyen en la mineralización de la materia orgánica del suelo y el flujo de carbono del suelo a la atmósfera; los factores topográficos (por ejemplo, elevación, pendiente y aspecto) determinan la producción y descomposición del litter por el control en el balance suelo – agua y el impacto de los niveles de materia orgánica del suelo (Griffiths et al., 2009). El balance suelo – agua puede ser un factor crítico en la determinación de los contenidos del COS, debido a que éste integra al clima, propiedades pedológicas, características topográficas y estrategias de manejo; ya que el estrés suelo – agua puede decrecer y altas temperaturas aceleran la descomposición de la materia orgánica (Norton et al., 2008).

Los cambios de uso del suelo impactan fuertemente en la fertilidad del suelo y en la variación de los COS almacenados (Karhu et al., 2011 y Wang et al., 2012), especialmente en tierras áridas y semiáridas donde los sumideros de COS son susceptibles de los cambios en uso del suelo y clima (Su et al., 2009). Las estrategias de manejo tales como la labranza de conservación, rotación de cultivos, reincorporación de residuos, fertilización balanceada pueden incrementar la concentración o almacenes de COS y CIS en los suelos (Mishra et al., 2010; Yang et al., 2012).

Por otra parte, el contenido de CIS es importante en zonas áridas y semiáridas del mundo en el secuestro o almacenamiento del C. El CIS comprende aproximadamente 950 Pg de C en la capa superficial (un metro de profundidad) es uno de los más grandes reservorios de C en el suelo (Eswaran et al., 2000).

Igualmente, juega un papel muy importante en el secuestro de C en el suelo (Lal, 2008). El C intercambiable entre el CIS y la atmósfera se ha estimado a razón de 62–622 g m⁻² año⁻¹ de C (Xie et al., 2009). La reserva existente más grande de CIS está como carbonato de calcio (CaCO₃) y dolomita (MgCO₃), y el CIS puede ser clasificado en carbono inorgánico litológico (CIL) y carbono inorgánico pedogenético (CIP) (Batjes, 1996).

El carbono en el suelo.

En general, la mayoría del carbono en el suelo se encuentra en los primeros 20-30 cm (Jaramillo et al., 2003; Acosta et al., 2001). La variación entre los bosques tropicales (selvas) es entre 34 – 115 Mgha⁻¹ de C. Este rango es mayor en comparación con los bosques templados y esto puede ser por un mayor gradiente de precipitación y tipo de suelo dentro de esta clase de ecosistema, que varían entre bosques tropicales semiárido a muy húmedo

El suelo es el gran reservorio de C de la naturaleza y puede actuar como fuente o reservorio de C dependiendo de su uso y manejo (Martínez et al., 2005). El COS se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento de los cultivos.

Segura et al. (2005) menciona que la capa superficial de los suelos de México tiene un contenido total de CO de 10.5 Pg. Por su parte, Vergara et al. (2004) en suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca México, sugiere que las estimaciones potenciales de captura de C en el suelo deben considerar diferentes porcentajes de C en el área de estudio. No obstante, las menores contribuciones se presentan en las regiones áridas, mientras que, por uso del suelo, se encontró que con agricultura de riego hay el menor contenido de COS (Segura et al., 2005).

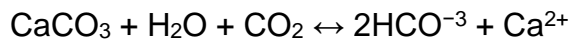
El CIS, el cual comprende aproximadamente 950 Pg de C en la capa superficial (un metro de profundidad) es uno de los más grandes reservorios de C en el suelo (Eswaran et al., 2000). El CIS juega un papel muy importante en el secuestro de C en el suelo (Lal, 2008). El C intercambiable entre el CIS y la atmósfera se ha estimado a razón de 62–622 g m⁻² año⁻¹ de C (Xie et al., 2009). La reserva existente más grande de CIS está como carbonato de calcio (CaCO₃) y dolomita (MgCO₃), y el CIS puede ser clasificado en carbono inorgánico litológico (CIL) carbono inorgánico pedogenético (CIP) (Batjes, 1996). El CIL está relacionado al material parental sin cambios químicos, mientras que el CIP se forma durante la precipitación de Ca²⁺ o Mg²⁺ y bicarbonato (HCO₃⁻), como se describe a continuación:



El bicarbonato se forma durante la disolución de CO² derivado de la respiración autótrofa y heterótrofa en la solución del suelo como sigue:



El Ca²⁺ o el Mg²⁺ se originan de la alteración de los carbonatos o silicatos con Ca/Mg, así como también de otros recursos externos de Ca²⁺ o Mg²⁺, tales como la lluvia y polvo (Monger y Martinez, 2001).



La más alta presión parcial de CO₂ asociada con la respiración, es derivada de las más grandes entradas de C, encima y debajo del suelo por litter, fertilización y también con un alto contenido de agua en el suelo, favorece la disolución de carbonatos. Por otra parte, una baja entrada de C en el subsuelo, combinado con un bajo contenido de humedad, favorece la precipitación de carbonatos (Lal, 2008).

La cantidad de CIS y su distribución a lo largo del perfil puede ser influenciada por el cambio de uso del suelo y las prácticas de manejo que están asociadas con los cambios en los contenidos de agua y presión parcial de CO₂. Sin embargo, los efectos de los cambios de uso y las prácticas de manejo sobre el CIS han sido negadas y por lo tanto no son claras (Chang et al., 2012)

El CO₂ de carbono en la tierra.

Uno de los gases más importante de efecto de invernadero es el CO₂. Aunque este gas existe naturalmente en la atmosfera, su concentración ha aumentado por las actividades antropogénicas en los últimos dos siglos. Hasta el año 1750 la concentración de CO₂ fue relativamente constante con un valor alrededor de 280 ± 10 ppm. Por la revolución industrial en 1850 y un rápido crecimiento de población humana a partir del año 1950 la concentración de CO₂ aumentó hasta 367 ppm al final del siglo XX (IPCC, 2000; Steffen et al., 2007). Su concentración actual es de 391.76 ppm (NOAA, 2011).

Diferentes actividades humanas son responsables por estas altas concentraciones de CO₂. En la escala global las principales fuentes de CO₂ son las emisiones por la combustión de energía fósil, la producción de cemento y el cambio de uso de suelo. Se calcula, desde el año 1850 que se deben de haber emitido a la atmósfera poco menos de 500 Gt, y alrededor de tres cuartas de esta cantidad se atribuyen al uso de combustibles fósiles; la mayor parte restante se debe al cambio en el uso del suelo y 5% a la producción de cemento (UNEP, 2009).

México se encuentra entre los 20 países con mayores tasas de emisión de CO₂ y las proporciones de las fuentes son muy parecidas a la escala global. En los 90's, 93% de la energía vino del petróleo, el cual es el primer emisor de CO₂, produciendo alrededor de 83.8 Mt de C, el segundo lugar son las emisiones provocadas por el cambio de uso de suelo con 30.2 Mt de C y finalmente la producción de cemento con un valor de 3.1 Mt de C. Para el año 2010 se estimó una emisión total de 879 Tg de CO₂, donde 83 % provienen del consumo de energía fósil (Scheinbaum y Masera, 2000).

Aunque en México el consumo de energía fósil es el primer lugar en la emisión de CO₂, la deforestación juega un papel importante. México se encuentra entre los países con mayor tasa de deforestación (Ordoñez et al., 2008).

En los 90's esta tasa se estimó entre 370 a 670 mil ha por año, con una emisión de CO₂ entre 50 a 62 ×10⁶ Mg de C (Masera et al., 2001). Esta emisión corresponde al 35% de las emisiones de CO₂ de México (Acosta et al., 2001; De Jong et al., 2001).

IPCC propone varias opciones tecnológicas para reducir las emisiones de CO₂, como: (1) la reducción del uso de combustibles fósiles, (2) substituir combustibles fósiles poco eficientes por combustibles más efectivos, (3) reemplazar la tecnología de combustibles fósiles con combustibles neutrales en CO₂, y (4) aumentar la absorción de CO₂ atmosférico por ecosistemas naturales (IPCC, 2001a).

Los ecosistemas terrestres almacenan alrededor de 2100 Gr C en organismos vivos, hojarasca y materia orgánica del suelo, lo que equivale casi al triple del que se encuentra presente en la atmósfera (UNEP, 2009). Por esta razón, los bosques, las tierras agrícolas y otros ecosistemas terrestres albergan un potencial importante en el contexto de mitigación de CO₂ de la atmósfera. Para México, Scheinbaum y Masera (2000), estimaron para el periodo 1990 a 2010 un potencial de mitigación en los ecosistemas forestales de 216 Tg de CO₂, lo que corresponde al 62% del potencial total que tiene este país. El potencial de mitigación de CO₂ varía entre los ecosistemas, dependiendo de la composición de especies vegetales, tipo de suelo, el clima y otras características (Torres y Guevara, 2002; UNEP, 2009).

La escala espacial y temporal es muy importante, un ecosistema intacto alberga una gran cantidad de carbono, mientras su potencial de mitigación es muy bajo por la respiración autótrofa y heterótrofa. Por lo tanto, un ecosistema que haya perdido gran parte de su carbono por degradación en el pasado puede tener un alto potencial de acumulación de carbono en el futuro (IPPC, 2001b).

Existen varias publicaciones sobre el potencial que tiene un ecosistema como sumidero de carbono en la escala global (IPCC 2000, Saugier et al., 2001; UNEP, 2009). Sin embargo, por la variación de factores espaciales y temporales se necesitan estudios a una escala regional de corto, mediano y largo plazo.

Estudiar la respuesta de los ecosistemas al cambio global requiere la determinación de carbono en diferentes escalas espaciales y partición de los reservorios en sus componentes (Buchmann, 2002).

En México se han aplicado diferentes métodos en diferentes escalas, ecosistemas, tipos de uso de suelo y componentes del reservorio, dependiendo del objetivo del estudio. Aún se necesitan estudios en la escala nacional (Segura et al., 2005) y regional (Acosta et al., 2001) sobre los reservorios de carbono. Por ello se necesita estudiar el flujo de carbono a largo y mediano plazo en diferentes escalas (Acosta et al., 2001; Mendoza y Galicia, 2010; Návar, 2010).

Para calcular los efectos del cambio de uso de suelo, se requieren estudios comparativos que permitan estimar los reservorios de carbono en los ecosistemas (Jaramillo et al, 2003; Návar, 2010). Para obtener una mayor exactitud en los resultados, el desarrollo de nuevas técnicas (Návar, 2011) y la aplicación de nuevos métodos (Ordoñez et al., 2001) son necesario para eliminar o disminuir las incertidumbres en la estimación de los flujos de carbono (De Jong, 2001). Para hacer un escalamiento al nivel nacional las herramientas de Sistemas de Información Geográficas (SIG) permiten resultados rápidos y una clasificación por ecosistema (bosques, selvas, matorrales, pastizales, manglares y pantanos), tipo de uso de suelo (forestal, agrícola, pecuario y urbano) y resultados separados para cada estado (Segura et al., 2005).

La mayoría de los estudios en México son en una escala regional y enfocada a algunos estados. Estos estudios son importantes para la contribución al inventario nacional de carbono, cuya información se puede utilizar para identificar aéreas potenciales para proyectos de captura de carbono (Ordoñez et al., 2008). Para determinar el efecto de cambio de uso de suelo, Jaramillo et al. (2003) estudiaron en Chamela, Jalisco, el reservorio total de carbono en un bosque semiárido, un humedal (floodplain) y un pastizal y compararon entre sus resultados totales de carbono.

Para determinar el reservorio de carbono total se necesitan estudios de los diferentes componentes: Los flujos de carbono en un ecosistema forestal son muy complejos, por eso se tiene que analizar la cantidad de carbono en los componentes aéreos y subterráneos (De Jong 2001; Ordoñez et al., 2001). Estos componentes son el carbón en el suelo y en la vegetación viva y muerta que se divide en raíces, árboles, arbustos, herbáceas, mantillo y ramas caídas (Ordoñez y Masera 2001; Etchevers et al. 2005). La suma de estos componentes es el reservorio total de carbono, el cual es importante para determinar la línea base en los proyectos de mitigación MDL que menciona el protocolo de Kyoto, como modelo “business as usual” (Masera et al., 2001; Etchevers et al. 2005). Para

calcular el potencial de almacenamiento en ecosistemas, también se tiene que incluir los flujos laterales.

Métodos y componentes para la determinación de carbono.

Para la determinación de la línea base y el potencial de mitigación en una escala más grande, es muy útil el programa “CO₂ Fix” (Ordoñez et al., 2001; De Jong et al., 2007). Este programa provee una simulación a corto, mediano y largo plazo. Incluye la vegetación, materia en descomposición, carbono en el suelo y los productos forestales.

Una alternativa en la modelación de proyectos de almacenamiento de carbono que incluya a todos los componentes es el programa “COMAP”, este tiene diferentes módulos: (a) tipo de uso de suelo, b) demanda de productos, c) estimación de carbono por tipo de uso de suelo y cobertura de vegetación y d) potencial de mitigación (Masera et al., 2001). Esta herramienta es ideal para la estimación del potencial en una escala nacional, sin embargo, se necesita una base de datos de otros autores o estudios previos. Echevers et al. (2005), describieron en su “Manual para determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas” métodos estándares que han usado diferentes autores: Jaramillo et al. (2003), Ordoñez et al. (2008), Návar et al. (2010). Aunque estos métodos no incluyen los flujos laterales, la determinación de carbono en los otros componentes para estimar la línea base son detallados. Los resultados de áreas agroforestales y plantaciones permiten estimar el potencial que éstas tienen como un uso alternativo en ecosistemas con disturbio.

Área de estudio

El municipio de Matamoros (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, a una altitud de 1 120 m. La altitud predominante se encuentra entre los 1110 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con una extensión territorial de 1003.7 Km², con 295 localidades y una población de 107,160 habitantes (INEGI, 2014).

Clima

La zona se caracteriza por presentar un clima muy seco o desértico, semi-cálido con lluvias en verano e invierno fresco con oscilación extrema; cuya precipitación total anual es de 250 mm y evaporaciones total anual promedio que alcanzan los 2500 mm (García, 2004). La temperatura fluctúa entre los 0° y 40 °C, pero puede alcanzar hasta 44 °C en verano y -8 °C en invierno. Los vientos predominantes tienen dirección sur con velocidad variable de 20 a 44 kilómetros por hora, los cuales generalmente provocan tolvaneras que cubren la visibilidad hasta algunos metros de distancia (INEGI, 2014).

Suelo

El espacio territorial donde se llevó a cabo el proyecto está conformado por dos provincias fisiográficas, las cuales son Sierras y Llanuras del Norte y Sierra Madre Oriental; así como tres subprovincias denominadas Bolsón del Mapimí, Laguna de Mayrán y Sierras Transversales (INEGI, 2014).

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 y zonas urbanas (INEGI, 2010).

ARTICULOS

Variabilidad Espacial del Carbono Orgánico e Inorgánico del Suelo en la Comarca Lagunera, México.

Titulo condensado: Carbono orgánico e inorgánico del suelo en una zona árida

Pedro Yescas-Coronado¹, Vicente de Paúl Álvarez-Reyna¹, Miguel Angel Segura-Castruita^{2*}, Mario García-Carrillo¹, Vicente Hernández-Hernández¹ y Guillermo González-Cervantes³

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna-Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias, Periférico y Carretera Sta. Fe, s/n. C.P. 27054, Torreón, Coahuila.

²Instituto Tecnológico de Torreón-DEPI. Carretera Torreón-San Pedro, km 7.5. Ejido Anna, C.P. 27170, Torreón, Coahuila.

³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID-RASPA) Desarrollo Km. 6.5 margen derecha canal Sacramento, C.P. 35150, Gómez Palacio, Durango.

*Autor para correspondencia: dmilys5@hotmail.com

Resumen

Las reservas de carbono orgánico, inorgánico y total son controladas parcialmente por la exposición a las condiciones ambientales, la cobertura vegetal y el uso del suelo. La geoestadística ha ayudado a comprender la distribución de los almacenes de carbono (orgánico, inorgánico y total) en el suelo. Sin embargo, existe escasa explicación de los

factores que la determinan, específicamente en zonas áridas, y de su variabilidad espacial. Los objetivos de este trabajo fueron determinar las reservas de carbono orgánico e inorgánico en suelos agrícolas de la Comarca Lagunera de México, establecer su distribución y variabilidad espacial mediante el método geoestadístico kriging ordinario y validar los mapas temáticos con datos reales. Las reservas de carbono orgánico, inorgánico y total del suelo de muestras georreferenciadas, se examinaron mediante un análisis de la semivarianza; los datos geoestadísticos se interpolaron, para obtener mapas temáticos de predicción de las mismas. Posteriormente, se validaron los mapas con datos de campo. Las reservas de carbono orgánico, inorgánico y total del suelo mostraron variabilidad espacial, cuya dependencia espacial del almacén de carbono orgánico del suelo fue débil (82.4%), mientras que la del carbono inorgánico y total fue moderada (26.6 y 35.0%, respectivamente). Los mapas temáticos de los almacenes de carbono orgánico e inorgánico difirieron; siendo el mapa de carbono inorgánico el que tuvo un error de 2.01 Mg ha⁻¹, menor que el de carbono orgánico (4.69 Mg ha⁻¹). El uso y manejo de los suelos en esta área influyeron en la distribución espacial de las reservas de carbono, mientras que la fisiografía, el material parental y el clima intervinieron en la distribución espacial del carbono inorgánico.

Palabras clave: materia orgánica, carbonatos, geoestadística, zonas áridas.

Abstract:

Organic, inorganic and total soil carbon stocks are partially controlled by exposure to environmental conditions, vegetation cover and land use. Geostatistics has helped to understand the distribution of carbon stokes (organic, inorganic and total) in the soils. However, there is little explanation of factors that determinant it, specifically arid regions,

and their spatial variability. The objectives of this work were to determine the organic and inorganic carbon reserves in agricultural soils of the Comarca Lagunera de México, to establish their distribution and spatial variability using ordinary kriging and to validate the thematic maps with real data. The correlation spatial of organic, inorganic and total soil carbon stocks of georeferenced samples were examined by an analysis of semivariance; the data were interpolated to obtain thematic maps of prediction of the different carbon stocks. Subsequently, the maps were validated with field data. The organic, inorganic and total soil carbon stocks showed spatial correlation, which was weak for the soil organic carbon storage (82.4%), and moderate for the inorganic and total carbon (26.6 and 35.0%, respectively). The thematic maps of organic and inorganic carbon stores differed; with the inorganic carbon map having an error of 2.01 Mg ha⁻¹, which was lower than that of organic carbon (4.69 Mg ha⁻¹). The use and management of soils in this area influenced the spatial distribution of carbon stocks, while physiography, parent material and climate intervened in the spatial distribution of inorganic carbon.

Keywords: Organic matter, carbonates, geostatistics, arid region.

1. Introducción

La variabilidad y distribución espacial de las reservas de carbono orgánico e inorgánico en el suelo (COS y CIS, respectivamente), como propiedades edáficas, están controladas parcialmente por las condiciones ambientales, cobertura vegetal y el uso del suelo (Guo *et al.*, 2006). Estos factores influyen en la velocidad de formación y transformación del carbono orgánico (CO) y en los cambios del carbono inorgánico (CI) del suelo, procesos que desempeñan un rol en el aumento o reducción de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera (West y Marland, 2002; Singh *et al.*, 2007). Por ello el interés

creciente en cartografiar las variaciones del COS y CIS para proveer al usuario del suelo de herramientas que permitan hacer un uso racional del suelo (Jaramillo, 2012; Orton *et al.*, 2016). La escala para cartografiar COS puede ser a nivel parcela, cuenca, zona agroecológica, región, país, continente (IIASA/FAO, 2012). El análisis de datos de perfiles de suelos mediante sistemas de información geográficos (SIG), es una alternativa para conocer la distribución espacial y vertical del COS, mismo que puede utilizarse para CIS. No obstante, hay escasez de datos georeferenciados (FAO, 2002), necesarios para aplicar técnicas geoestadísticas para conocer la distribución espacial del COS a diferentes escalas, y mejorar las estimaciones espaciales (Paz-Pellat *et al.*, 2016). En México se han realizado estudios que muestran la distribución espacial del COS a nivel país (Segura-Castruita *et al.*, 2005; Etchevers *et al.*, 2006; Paz-Pellat *et al.*, 2012; Cruz y Paz, 2013). Para estimar el potencial de captura de carbono en el suelo en diferentes escenarios, es necesario establecer una línea base de carbono para evaluar posteriormente cómo las concentraciones se modifican en función del cambio de uso del suelo o de las prácticas de manejo (Batjes, 1999). Sin embargo, no se tiene certidumbre acerca de los cambios del COS ni del CIS, en un lugar determinado en regiones áridas y semiáridas (Luo *et al.*, 2011). En un análisis de la distribución espacial y temporal de COS se concluyó que, independientemente de la metodología utilizada y sus bases de datos, las estimaciones realizadas tienen el defecto de no poderse validar porque no se han empleado modelos predictivos (Paz-Pellat *et al.*, 2016). La información disponible se refiere principalmente a regiones templadas y tropicales (Segura-Castruita *et al.*, 2005), pero las regiones áridas y semiáridas han sido menos estudiadas. Al respecto, Montañó *et al.* (2016) mencionaron cómo la alta heterogeneidad espacio-temporal de estas regiones, las condiciones ambientales, la comunidad vegetal y el uso del suelo, afectan los almacenes y flujos del

carbono. Información relacionada con los almacenes de CIS y su cartografía es escasa (Segura-Castruita *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2006), al igual que el comportamiento de su variabilidad espacial. Determinarla resulta importante, ya que la aplicación de enmiendas orgánicas se ha convertido en una práctica común en áreas con agricultura intensiva en los distritos de riego de regiones áridas y semiáridas de México. Por ejemplo, los suelos de cultivo del Distrito de Riego 017 en la Comarca Lagunera, reciben año con año, aproximadamente entre 80 y 120 Mg ha⁻¹ de enmiendas orgánicas (Fortis-Hernández *et al.*, 2009), pero el efecto de estas aplicaciones en las reservas y el comportamiento espacial del COS y del CIS es desconocido. La distribución espacial de las reservas de COS y CIS en la Comarca Lagunera podría establecerse con datos georreferenciados de muestras de suelo y la aplicación de métodos geoestadísticos; con ello se podrían generar modelos predictivos, así como establecer relaciones con las características climáticas y el uso del suelo. Los objetivos de este trabajo fueron determinar el COS y CIS en suelos agrícolas de la Comarca Lagunera de México, establecer su distribución y variabilidad espacial mediante el método geoestadístico kriging ordinario (KO) y verificar la precisión de los mapas temáticos.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Matamoros (Figura 1), Coahuila, México (25° 23' y 25° 48' latitud norte y 103° 23' y 103° 03' longitud oeste), que se encuentra en la parte plana de un valle, con altitudes que varían de 1100 a 1150 m en las partes bajas planas, hasta 1580 m en las cimas de los cerros.

El clima del municipio es un BW hw'' (e'), correspondiente a muy seco o desértico, semicálido con lluvias en verano e invierno fresco y oscilación extrema. La precipitación total anual promedio es de 250 mm y una evaporación total anual promedio de 2500 mm (García, 2004); como se muestra en el climograma de área de estudio (Figura 2).

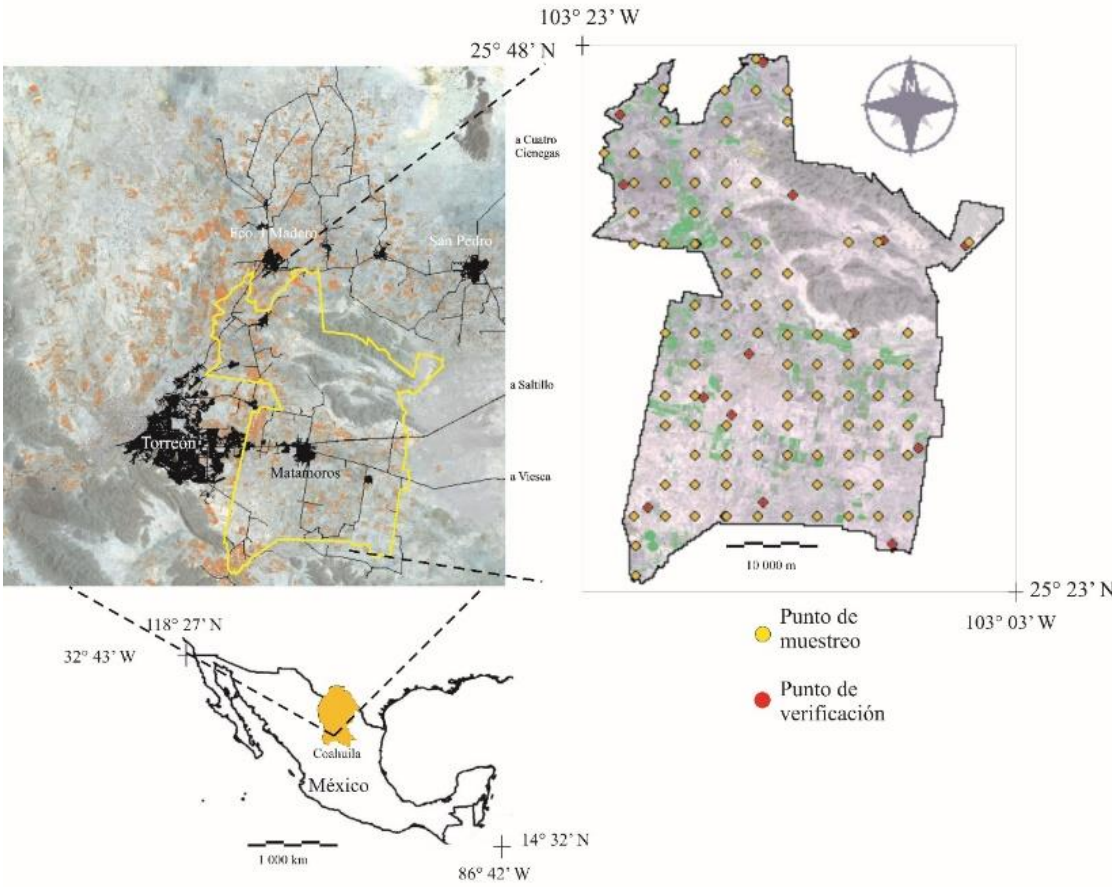


Figura 1. Localización del área de estudio

Estación meteorológica “El Cuije”, Lat. 25° 41.8', Alt. 1120 msnm (record 29 años).

Mes	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)
E	15.7	8.4	98.8
F	17.4	3.8	113.3
M	20.1	0.9	167.7
A	23.1	7.5	193.3
M	26.1	23.9	231.1
J	27.1	23.2	222.0
J	27.2	28.4	225.6
A	26.6	17.9	206.2
S	25.7	26.6	175.1
O	23.0	17.4	148.5
N	19.0	9.1	112.4
D	15.7	12.9	94.2
Anual	22.2	180.0	1988.1

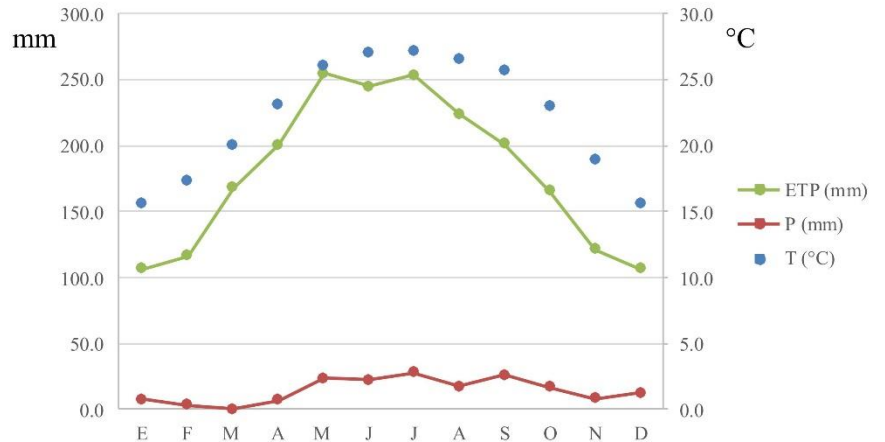


Figura 2. Climograma estación meteorológica El Cuije, municipio de Matamoros, Coahuila.

La vegetación está dominada por matorrales xerófitos, aunque las praderas y el bosque espinoso (mezquite) son comunes. La alta concentración de sales en los suelos de esta región determina la existencia de una vegetación halófila dominante en el paisaje. Las plantas de matorrales del desierto, incluidos los rosetófilos y micrófilos ocurren en un patrón irregular, compuesto principalmente de *Larrea tridentata* y halófitas. La geología del área está caracterizada por su origen (periodo Cuaternario y Cretácico), donde las rocas ígneas de la Sierra Madre Occidental son la principal fuente de sedimentos aluviales, que fueron transportados por corrientes fluviales a través de los ríos Aguanaval y Nazas, que alimentaban el Paleolago Irritila (Figura 3a) en esta región (Czaja *et al.*, 2014). La geomorfología de la cuenca (Figura 3b) se compone de depósitos tanto sedimentarios (calizas, dolomitas, yeso, arenas arcillosas y conglomerados) como de rocas ígneas (depósitos volcánicos y granito) (Mejía-González *et al.*, 2014).

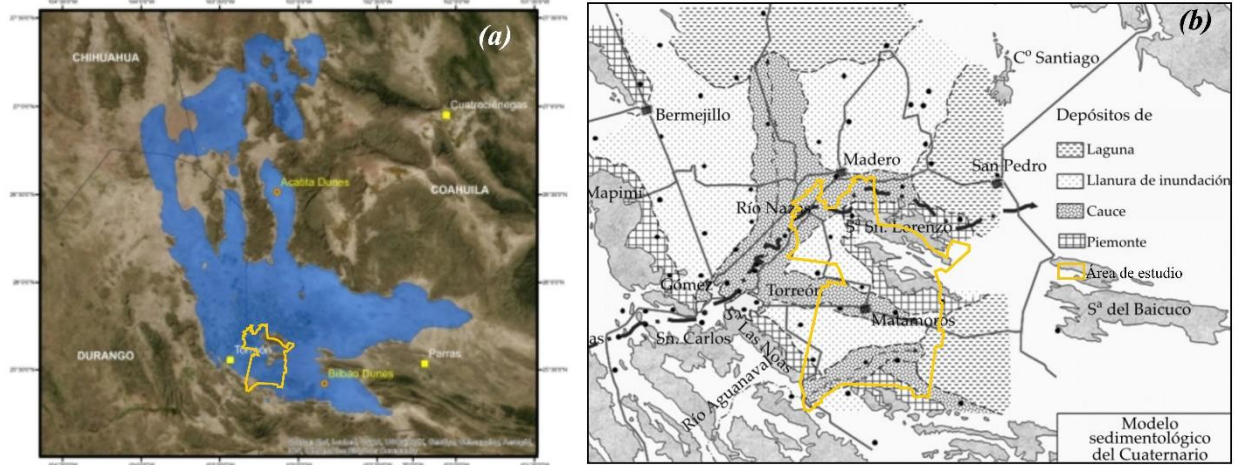


Figura 3. a) Perspectiva del área de estudio en el Paleolago Irritila (Adaptado del Czaja *et al.*, 2014); b) Geomorfología del área de estudio en un modelo sedimentológico (Adaptado de Mejía-González *et al.*, 2014)

Los sedimentos que se han identificado en dunas de la región están ligeramente redondeados e incluyen minerales como cuarzos, feldspatos, apatitas, micas, anfíboles (hornblenda), piroxenos y granos de magnetita, hematita y calcita; la forma ligeramente redondeada revela una corta distancia de transporte desde su procedencia (Czaja *et al.*, 2014). Aparte, también se identifican sedimentos eólicos, así como afloramientos de calizas, yeso y conglomerados. Los suelos dominantes en el área del municipio que se han identificado son Feozems (60%), Regosoles (20%) Calcisoles (10%) y Leptosoles, Fluvisoles y Vertisoles (INEGI, 2016). El uso del suelo es principalmente agrícola y abarca el 68% de la superficie del municipio; también hay áreas urbanas (7%); la vegetación natural (área sin uso aparente) corresponde a matorrales y pastizales (INEGI, 2010).

2.2. Métodos

El estudio se dividió en seis etapas: a) selección de los sitios de muestreo, b) muestreo de suelo, c) análisis de laboratorio, d) procesamiento de datos, e) validación de los mapas y f) análisis estadístico, que se describen a continuación.

2.2.1. Selección de los sitios de muestreo

Una cuadrícula (2500 x 2500 m) con proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) se sobrepuso en el polígono del área de estudio (Figura 1), con el fin de diseñar y realizar un muestreo sistemático. Cada vértice de la cuadrícula constituyó un sitio potencial de muestreo, se definieron 108 sitios. La ubicación de cada punto se registró para su posterior localización en campo. La elección final de los sitios de muestreo se condicionó al criterio de accesibilidad (carreteras pavimentadas, terracerías y brechas) a los lugares de interés, para lo cual se utilizó la carta topográfica de la región (INEGI, 2016b), quedando al final 92 sitios.

2.2.2. Muestreo de suelos

Una muestra única de dos kilogramos de suelo de la capa superficial (0 a 30 cm) se recolectó en el punto seleccionado o lo más cercano a éste. Cada punto se georreferenció en campo con un geoposicionador satelital (GPS) y se registró el uso de suelo y el tipo de manejo en cada sitio.

2.2.3. Análisis de laboratorio

Las muestras se secaron a temperatura ambiente y a la sombra. Cuatro agregados de cada muestra de suelo se separaron para determinar densidad aparente (D_a) por el método del terrón emparafinado; este método se utilizó porque al extraer algunas muestras con el

cilindro de núcleo, se desmoronaban, lo que provocaría errores en los cálculos, pero presentaban agregados (terrones) de volumen indefinido, situación que se puede presentar en suelos suficientemente coherentes (SSS, 2014). El suelo restante se molió y tamizó, primero a través de una malla de 2 mm, que sirvió para la determinación del carbonato de calcio equivalente (Horton y Newson, 1953) y pH (en agua 1:2); otra parte de este suelo se tamizó en una malla de 0.5 mm de diámetro, antes de determinar el porcentaje de CO total (Walkley y Black, 1934); es importante aclarar que, este método determina el porcentaje de materia orgánica (MO) y se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_4$) y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4); después de un tiempo de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso ($FeSO_4$ 1N a pH 7). Este procedimiento detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total, por lo cual es necesario introducir un factor de corrección, que puede variar entre suelo y suelo; en los suelos de México se utiliza el factor 1.2987 (1/0.77) (SEMARNAT, 2002). Posteriormente se estimó el CO total al dividir la MO entre el factor de Van Benmelen (1.724), que resulta del supuesto que la MO contiene un 58% de CO. Los procedimientos se tomaron de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-REC NAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Aparte, el porcentaje de carbono total (CT) del suelo se obtuvo por la suma aritmética del CO y CI. Los patrones y reactivos que se utilizaron fueron de la marca Merck®. Los almacenes de COS, CIS y CTS se obtuvieron mediante la ecuación 1, propuesta por Ellert *et al.* (2006).

$$CSD_i = \frac{CS_i \times Da_i \times H_i \times (1 - \eta_i)}{10} \quad (1)$$

donde: CSD_i representa los almacenes de COS, CIS o CTS en $Mg\ ha^{-1}$ de C en la capa 0-30 cm de profundidad; CS_i representa el contenido de CO, CI o CT ($g\ kg^{-1}$) en la capa i ; Da_i es la densidad aparente ($g\ cm^{-3}$) de la capa i y H_i es su espesor (cm). El término η_i representa el porcentaje de las partículas con un tamaño > 2 mm en la capa, que se aplicó en aquellas muestras que presentaron este tamaño de partícula.

2.2.4. Procesamiento de datos

Las coordenadas y los resultados de COS, CIS y CTS se registraron en una base de datos, que se utilizó para la realización de dos pasos. El primero consistió de un estudio estructural de las variables (COS, CIS y CTS) en el espacio con un análisis de la semivarianza, donde se analizó la similitud que existe entre observaciones a determinadas distancias estandarizadas llamadas retardos o *lag* (Jaramillo, 2012), con la ecuación (2).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

donde $\gamma(h)$ es la semivarianza para COS, CIS o CTS de todas las muestras localizadas en el espacio por el intervalo de distancia (h); $N(h)$ es el número total de pares por un intervalo de distancia (h); $Z(x_i)$ es el valor de la muestra en una localización x_i ; $Z(x_i+h)$ es el valor de la muestra a la distancia del intervalo h hasta x .

El número de *lags* en nuestro estudio fue de 15, con un tamaño para cada uno de 1700 m, en una distancia activa de 25500 m. A partir de este semivariograma experimental, las

semivarianzas se ajustaron a un modelo esférico, ya que es el único que presenta sill o meseta verdadera, aspecto importante en la determinación del rango o alcance (Gallardo, 2006; Liu *et al.*, 2006); asimismo, porque se cuantificó la variabilidad espacial (semivariograma teórico) de las variables de estudio para su comparación. Los parámetros que se utilizaron en la interpolación y que ayudaron a explicar la variabilidad espacial del COS, CIS y CTS, fueron el rango (alcance), nugget o efecto pepita (C_0), sill o meseta ($C_0 + C$) y la varianza estructural (C); también, se obtuvieron el grado de dependencia espacial [$C_0/(C_0 + C)$] y la proporción de la varianza explicada por el espacio o grado de variación espacial [$C/(C_0 + C)$] (Gallardo, 2006; Jaramillo, 2012). Esta información se utilizó para generar modelos de predicción y mapas temáticos de almacenes de carbono mediante interpolaciones con KO, útil en variables ambientales y agrícolas (Elbasiouny *et al.*, 2014). Los procedimientos se llevaron a cabo con el módulo Geoestatistical Analyst del software ArcMap 10.3[®] (ESRI, 2014). Asimismo, en cada mapa de predicción (COS_p, CIS_p y CTS_p) los almacenes de carbono se agruparon en cinco clases. También, en este módulo se realizó el segundo paso, que consistió en una validación cruzada de los valores observados (COS, CIS y CTS) y los obtenidos con los modelos de predicción o valores predichos (COS_p, CIS_p y CTS_p) para obtener los estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), media del error de la predicción (ME_p), raíz cuadrada media del error de la predicción ($RCME_p$), media del error estandarizado de la predicción (MEE_p), promedio del error estándar de la predicción (PEE_p) y raíz cuadrada media del error estandarizado de la predicción ($RCMEE_p$), con el fin de diagnosticar si los modelos fueron útiles en la elaboración de mapas predictivos (ESRI, 2014).

2.2.5. Validación de los mapas

La validación de los mapas de predicción se verificó en 16 puntos que se seleccionaron en forma digital con un muestreo simple aleatorio estratificado en el área de estudio (Brus *et al.*, 2011; Segura-Castruita *et al.*, 2014), procedimiento que se realizó con el módulo “Sample” (Random) de Idrisi-Selva (Eastman, 2013); se registraron las coordenadas y el valor del píxel de cada sitio en los mapas temáticos correspondientes, que representaban el carbono predicho (COS_p y CIS_p). Posteriormente, se acudió a campo y se colectó una muestra de suelo de la capa superficial de cada sitio seleccionado, misma que se llevó a laboratorio y se le determinó el porcentaje de CO, CI y Da, para calcular el almacén o la reserva de COS y CIS a una profundidad de 30 cm. Estos resultados se compararon con los valores predichos. Finalmente, se elaboró una matriz de error.

2.2.6. Análisis estadístico

Se calcularon los estadísticos descriptivos (media, máxima, mínima, desviación estándar y coeficiente de variación) de la Da y los porcentajes de CO y CI; así como de los almacenes de COS y CIS, además para estas últimas se calcularon la asimetría y la curtosis. El desempeño de los modelos en comparación con datos de campo se estimó mediante índices estadísticos como la raíz cuadrada media del error (RCME) y el error medio del sesgo (EMS) con las siguientes ecuaciones (Douglas *et al.*, 2009):

$$RCME = \left((1/n) \sum_1^n (y - \hat{y})^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

donde $RCME$ es la raíz cuadrada de la media del error en $Mg\ ha^{-1}$, y es el almacén de carbono predicho que se estimó con los modelos predictivos para cada mapa temático (en su caso COS_p , CIS_p o CTS_p) que se evaluaron en este estudio, \hat{y} es el almacén de carbono medido (COS , CIS y CTS), correspondientes a las muestras de suelo en los puntos de verificación.

$$EMS = ((1/n) \sum_1^n (y - \hat{y}))$$

(4)

donde EMS es el error medio del sesgo en $Mg\ ha^{-1}$, el resto de los símbolos indican lo mismo que en la ecuación (3). El software que se utilizó para esta etapa fue el Minitab 17 (Minitab Inc., 2013).

3. Resultados

El número de sitios que se logró muestrear fue 92, ya que algunos de los originalmente planteados se encontraban en lugares inaccesibles o no correspondían a suelo (áreas pavimentadas o estanques). Los suelos muestreados tuvieron una D_a que varió de 1.03 a 1.57 $g\ cm^{-3}$ (Tabla 1), lo cual reflejó las diferencias físicas entre los suelos, como se pudo constatar de manera visual con el tamaño de partículas, ya que en la cercanía de los ríos (abanicos aluviales), se encontraron partículas gruesas (arenas medias y finas), mientras que en el resto del área (llanuras de inundación) las partículas eran más finas (limos y arcillas). Los valores de pH variaron de 7.15 a 9.45, suelos entre neutros y alcalinos, respectivamente. Los porcentajes de carbono de los suelos variaron en función de su forma

química (Tabla 1), de tal manera que el CO promedio (1.15%) es menor que el CI promedio (4.72%), comportamiento que se repitió en todos los suelos del área de estudio.

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

Variable	<i>N</i> *	\bar{x}	σ	$\bar{x} \pm \sigma$	CV	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
CO (%)	92	1.15	0.57	(0.58 – 1.72)	46.63	0.15	2.16	-0.05	-1.21
CI (%)	92	4.72	1.87	(2.65 – 6.59)	39.69	2.21	11.26	0.85	0.32
CT (%)	92	5.87	2.00	(3.87 – 7.87)	34.04	2.67	12.82	0.85	0.57
pH	92	8.43	0.47	(7.96 – 8.90)	5.66	7.15	9.45	-0.57	0.41
Da (g cm ⁻³)	92	1.25	0.09	(1.16 – 1.34)	7.43	1.13	1.57	0.45	0.97
COS (Mg ha ⁻¹)	92	4.27	2.01	(2.26 – 6.28)	47.66	0.58	7.98	-0.07	-1.10
CIS (Mg ha ⁻¹)	92	17.70	7.10	(10.60 – 24.80)	40.07	8.39	42.21	0.74	0.05
CTS (Mg ha ⁻¹)	92	21.97	7.35	(14.62 – 29.32)	33.48	10.79	48.06	0.69	0.36

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

Asimismo, las variables en estudio se ajustan a una distribución normal, ya que la asimetría y curtosis se encuentran dentro del intervalo que va de -3 a 3 (donde se supone que se encuentra el 99.5% de los datos de las variables). Por otra parte, los puntos muestreados tuvieron diferentes usos del suelo (Tabla 2), el 72% con uso agrícola de los cuales se encontraban en descanso (hasta 10 años) 23 sitios, sin uso aparente (26%) y urbano (2%). Los suelos agrícolas sostenían al momento del muestreo cultivos de alfalfa (10 sitios), algodón (6 sitios), frijol (un sitio), maíz y sorgo forrajero (21 sitios) y hortalizas (6 sitios); algunas con uso intensivo con dos cultivos anuales (monocultivos o rotaciones), otras con un cultivo anual (ciclo primavera-verano) y semiperennes o perennes. Toda el área agrícola es de riego (con agua de presa y pozo profundo), puesto que todo el municipio tiene un clima árido; asimismo, el 59.1% de esta área recibe enmiendas orgánicas de estiércol.

Cuadro 2. Sitios de muestreo con coordenada UTM y su uso del suelo y manejo.

ID	S†	X	Y	Uso	Manejo	ID	S	X	Y	Uso	Manejo
1	1	677631	2849930	Agrícola	1AwOm	47	87	685069	2825029	Agrícola	2Tph
2	4	670063	2847386	Agrícola	2Trm	48	88	689988	2825023	Agrícola	1Apa
3	5	675065	2847381	Sin uso	-	49	90	670116	2822509	Sin uso	-
4	6	677612	2847395	Agrícola	1ArOm	50	91	672634	2822510	Sin uso	-
5	7	680138	2847402	Agrícola	2TD	51	92	675112	2822503	Sin uso	-
6	9	670127	2844854	Agrícola	1ApOm	52	94	680150	2822481	Agrícola	1ApOm
7	10	675078	2844860	Agrícola	2Trs	53	95	682543	2822504	Agrícola	2TD
8	12	680132	2844890	Agrícola	2TD	54	96	685080	2822493	Agrícola	2TD
9	13	665174	2842326	Agrícola	1ApOm	55	97	687570	2822490	Agrícola	2TD
10	14	667582	2482337	Agrícola	1ApOs	56	98	689969	2822504	Sin uso	-
11	16	672592	2842336	Agrícola	2Trg	57	99	670135	2820008	Sin uso	-
12	20	667596	2839877	Agrícola	1TpOg	58	100	672649	2820027	Agrícola	1ApOm
13	21	670094	2839827	Agrícola	2Trm	59	101	675133	2820003	Sin uso	-
14	22	672621	2839821	Agrícola	1Trs	60	102	677663	2820017	Agrícola	2TD
15	23	675112	2839838	Agrícola	2TD	61	103	680163	2820010	Sin uso	-
16	24	677588	2839848	Agrícola	2TD	62	105	685065	2820018	Agrícola	1Apg
17	29	667611	2837427	Agrícola	2TD	63	106	687572	2819996	Agrícola	2TD
18	31	672606	2837417	Agrícola	1ApOa	64	107	689992	2820001	Sin uso	-
19	32	675112	2837406	Agrícola	2Twm	65	110	672642	2817608	Agrícola	2Trm
20	42	667625	2834864	Agrícola	2TD	66	111	675142	2817611	Agrícola	1ApOa
21	43	670073	2834903	Agrícola	2Trf	67	112	677663	2817612	Agrícola	2Tph
22	44	672624	2834939	Agrícola	1ApOm	68	113	680155	2817626	Agrícola	1ApOa
23	45	675081	2834950	Agrícola	1ApOm	69	114	672583	2817615	Agrícola	2TD
24	46	677630	2834932	Agrícola	1ApOa	70	115	685056	2817605	Agrícola	2Tph
25	49	685054	2834960	Agrícola	2TD	71	116	687585	2817609	Agrícola	2Tra
26	50	687554	2834958	Sin uso	-	72	117	689989	2817600	Agrícola	1Apg
27	53	695014	2834963	Sin uso	-	73	119	670151	2815132	Sin uso	-
28	54	675090	2832407	Agrícola	2TD	74	120	672649	2815102	Sin uso	-
29	55	677636	2832420	Agrícola	1ApOa	75	121	675151	2815104	Sin uso	-
30	56	680141	2832430	Agrícola	2TD	76	122	677656	2815113	Agrícola	1Aph
31	61	672617	2829909	Agrícola	1Arg	77	123	681066	2815132	Sin uso	-
32	62	675126	2829907	Agrícola	2Trm	78	124	682558	2815124	Sin uso	-
33	63	677627	2829921	Agrícola	2Trs	79	125	685059	2815102	Agrícola	1ApOa
34	64	680147	2829912	Agrícola	2TD	80	126	687567	2815104	Sin uso	-
35	70	670123	2827524	Agrícola	1ApOm	81	128	667651	2812636	Sin uso	-
36	71	672640	2827520	Agrícola	2TD	82	129	670149	2812652	Sin uso	-
37	72	675128	2827510	Agrícola	2Trm	83	130	672644	2812634	Sin uso	-
38	73	677639	2827516	Agrícola	2Trm	84	131	675146	2812639	Sin uso	-
39	74	680146	2827505	Agrícola	2TD	85	132	677663	2812631	Sin uso	-
40	75	682573	2827497	Agrícola	1ApOa	86	133	680157	2812634	Agrícola	2TD
41	76	685047	2827496	Sin uso	-	87	134	682570	2812618	Agrícola	1Apa
42	78	689963	2827527	Agrícola	2Trh	88	135	685068	2812599	Agrícola	2TD
43	81	672638	2825024	Agrícola	2Trg	89	136	687572	2812621	Agrícola	2TD
44	84	680146	2825014	Agrícola	2TD	90	137	689980	2812580	Agrícola	2TD
45	85	682551	2825013	Sin uso	-	91	138	667668	2810173	Agrícola	1ApOm
46	86	685069	2825022	Sin uso	-	92	142	667672	2807684	Agrícola	2Tph

†S: sitio de muestreo; 1: pequeña propiedad, 2: ejidal; A: manejo altamente tecnificado; T: manejo tradicional; D: en descanso (más de 10 años); p: riego con agua de pozo; r: riego agua rodada; w: riego aguas residuales; O: enmienda orgánica; a: alfalfa; f: frijol; g: algodón; m: maíz; n: nogal; s: sorgo.

3.1. Variabilidad espacial del carbono

La variabilidad espacial entre COS, CIS y CTS no fue similar (Figura 4), aun cuando las semivarianzas ($\gamma(h)$) de cada atributo se ajustaron al modelo esférico con coeficientes de determinación mayores que 0.85.

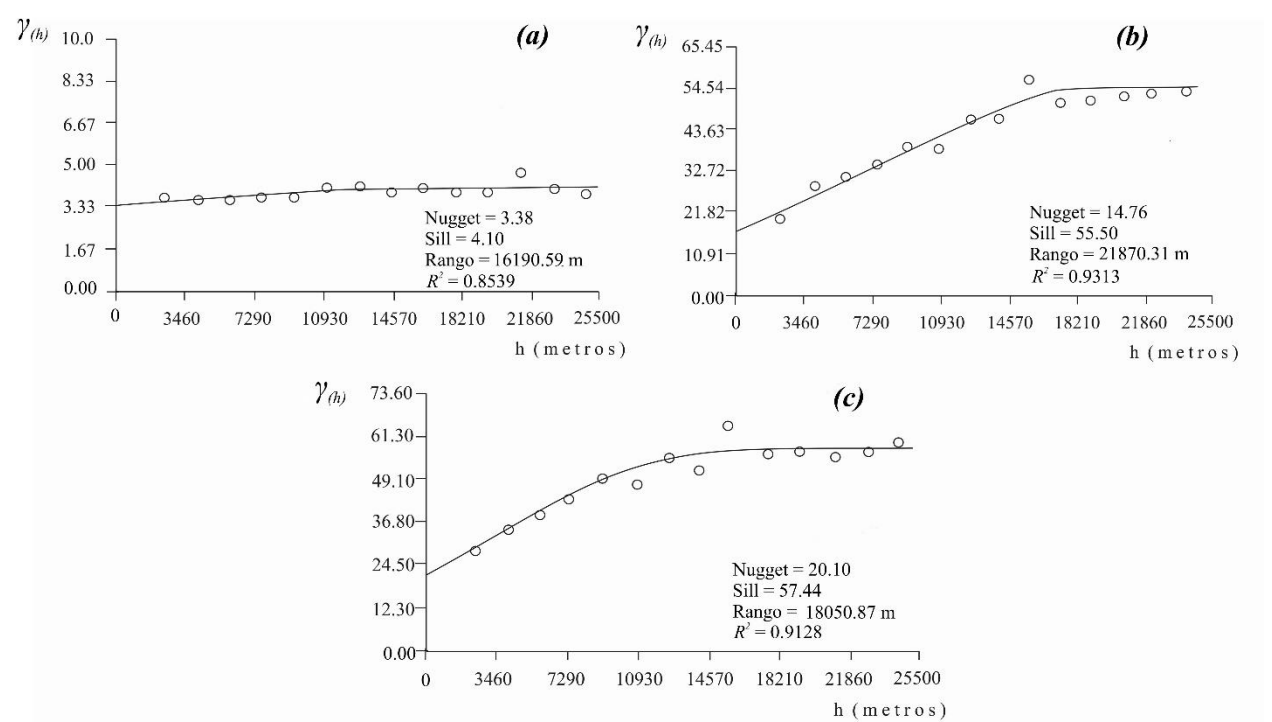


Figura 4. Semivariogramas de la semivarianza de los contenidos de carbono en los suelos de Matamoros, Coahuila; (a) carbono orgánico; (b) carbono inorgánico; (c) carbono total.

Los semivariogramas teóricos revelaron que las varianzas no explicadas por el modelo [nugget (C_0)] fueron menores que las sill ($C_0 + C$) correspondientes (Figura 4). No obstante, la varianza estructural (C) de la semivarianza de CIS y CTS, fue mayor que el

nugget respectivo (Tabla 3); en cambio, COS tuvo una C de 0.72, menor que su nugget (3.38). El rango o alcance de la semivarianza de COS, CIS y CTS fue grande (> 16000 m), ocupando 63.49, 85.76 y 70.78%, respectivamente, de la distancia efectiva de estudio (25500 m); longitudes mayores en todos los casos a las distancias de muestreo (2500 x 2500 m), lo que muestra que la dependencia espacial de las variables ocurre en parte del área de estudio y no en el total de la misma, aunque dicha dependencia es mayor en el caso de CIS (21870.31 m). Tal situación se constató con el grado de dependencia espacial [$C_o/(C_o + C)$] que varió en los tres casos (Tabla 3); el CIS y CTS tuvieron moderada dependencia espacial, pero en el COS fue débil. En cambio, la varianza explicada por el espacio o grado de variación espacial [$C/(C_o + C)$] para CIS y CTS fue mayor que 50%, superior que la obtenida para el COS (17.56%), lo que indica que CIS es más predecible espacialmente y por lo tanto la incertidumbre al interpolar los datos es menor.

Tabla 3. Relaciones de la varianza estructural y nugget con el sill de las semivarianzas de los contenidos de carbono

Variable	C	$C/(C_o + C)$ (%)	$C_o/(C_o + C)$ (%)
COS	0.72	17.56	82.44
CIS	40.74	73.40	26.60
CTS	37.34	65.00	35.00

[†] C : varianza estructural, $C/(C_o + C)$: grado de variación espacial,

$C_o/(C_o + C)$: grado de dependencia espacial

La validación cruzada mostró que el modelo para COS_p tuvo un $R^2 = 0.7602$, menor que en CIS_p ($R^2 = 0.9460$). No obstante, los modelos de predicción tuvieron errores bajos después de la validación (< 0.05), ya que sus ME_p y la MEE_p son cercanos a cero (Tabla

4), donde la MEE_p de la variable COS_p fue más baja (0.0003). Estos resultados indican que, en los tres casos, las predicciones no se ajustan a los valores medidos. Al evaluar la incertidumbre de las predicciones se tuvo que la $RCME_p$ del COS_p (4.6597) fue mayor que el PEE_p (1.9697), esto significa que se subestimó la variabilidad de las predicciones; este resultado se confirmó al verificar que la $RCMEE_p$ (1.0216) fue mayor que uno, situación inversa en CIS y CTS que tuvieron una $RCME_p$ menor que el PEE_p , lo que indica una sobreestimación en la variabilidad de las predicciones, como se observó en el $RCMEE_p$ que fue menor que uno.

Cuadro 4. Resultados de la validación cruzada

Variable	N^{\dagger}	R^2	ME_p	$RCME_p$	MEE_p	$RCMEE_p$	PEE_p
COS_p	92	0.7602	0.0079	4.6597	0.0003	1.0216	1.9697
CIS_p	92	0.9460	-0.0455	2.0158	-0.0054	0.9530	4.9752
CTS_p	92	0.9309	-0.0300	5.2717	-0.0035	0.9502	5.6341

$^{\dagger}N$: número de muestras, R^2 : coeficiente de determinación, ME_p : media del error de la predicción, $RCME_p$: raíz cuadrada media del error de la predicción, MEE_p : media del error estandarizado de la predicción, $RCMEE_p$: raíz cuadrada media del error estandarizado de la predicción, PEE_p : promedio del error estandarizado de la predicción.

3.2. Distribución espacial de los almacenes de carbono

El mapa temático de COS presentó el mayor almacenamiento ($> 4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$) en el norte (Figura 5a), área donde se encuentran suelos que reciben enmiendas orgánicas (80-120 Mg ha^{-1} cada año); mientras que las reservas más bajas se localizaron principalmente al noreste ($< 2.5 \text{ Mg ha}^{-1}$). En cambio, el carbono inorgánico se encontró en franjas irregulares (Figura 5b), donde las menores acumulaciones se hallaron al noroeste y parte del centro ($< 10.5 \text{ Mg ha}^{-1}$), que son lugares con uso agrícola intensivo y con aplicaciones de enmiendas orgánicas; en cambio, las mayores acumulaciones se encontraron en sitios

sin uso aparente (suelos que los productores conocen como arenales) con vegetación de matorral desértico o con diez años de descanso (con presencia de matorrales), que se ubican en la parte sur (14.5 a 27 Mg ha⁻¹) y en la porción sureste (> 27 Mg ha⁻¹), en las llanuras de inundación y en el abanico aluvial del río Aguanaval, respectivamente, a una altitud que variaba de 1115 a 1150 m (Figura 6). En tanto que, los contenidos de 10.5 a 12.5 Mg ha⁻¹, se ubicaron en la parte media del municipio en sitios con suelos de textura media y fina, que se encontraron en los llanos de inundación del río Nazas a una altitud de 1110 a 1115 m. Una distribución similar se tuvo para CTS (Figura 5c), donde los menores almacenamientos (< 14.5 Mg ha⁻¹) se ubicaron al norte, en el piedemonte de cerros de calizas y yeso, sin la influencia de los ríos mencionados, pues sus altitudes son mayores que 1130 metros. En el almacén de carbono total en el suelo (CTS), las reservas de CIS influyeron en un 79.5% promedio y con una correlación entre COS y CIS de tendencia negativa (-0.016, $p = 0.88$).

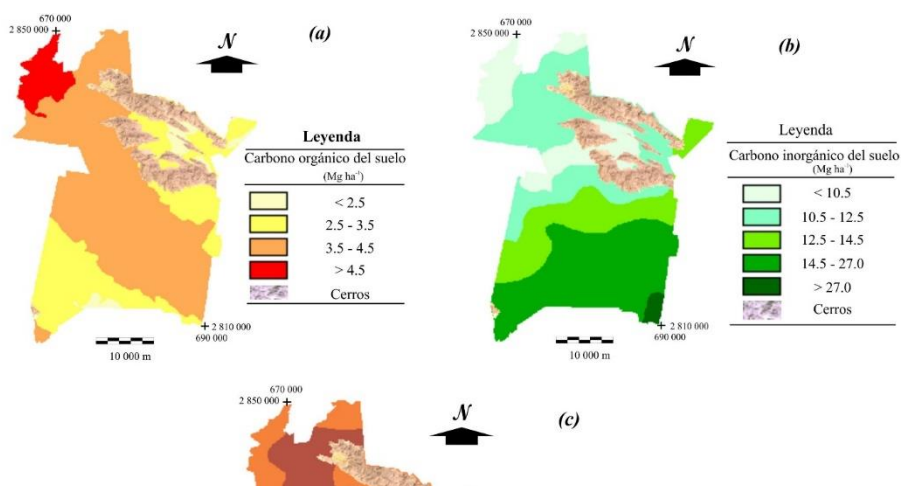


Figura 5. Mapas temáticos de contenido de carbono de Matamoros, Coahuila; (a) COS; (b) CIS; (c) CTS.

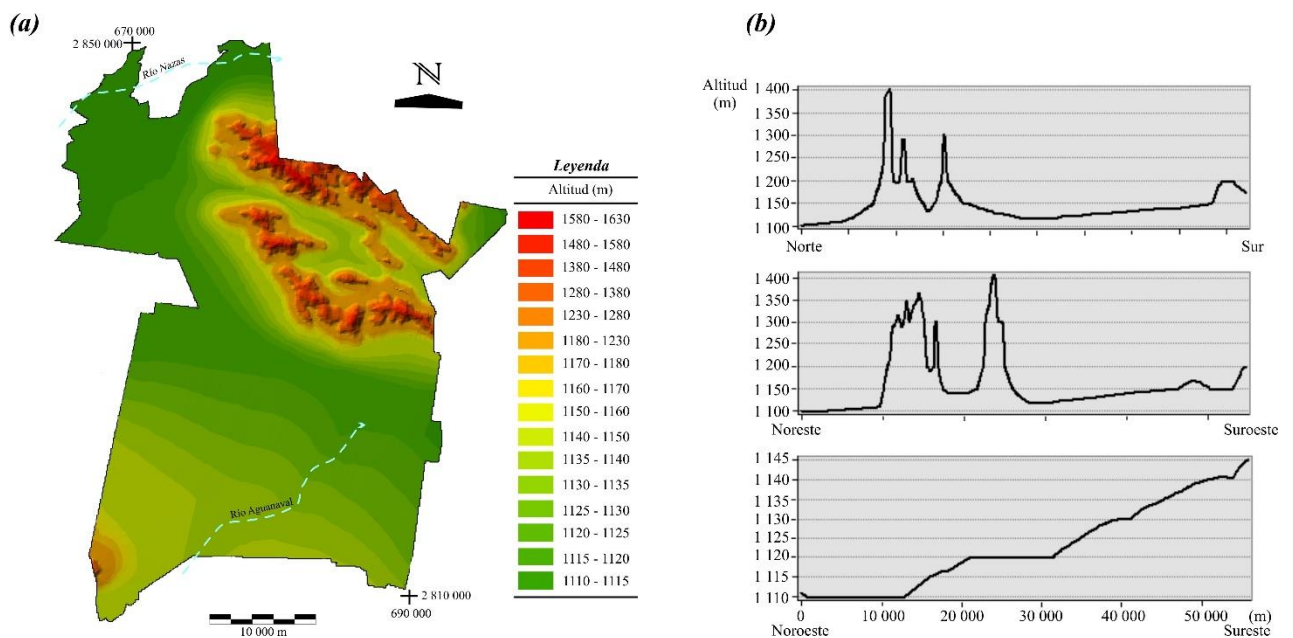


Figura 6. Planimetría de la fisiografía del municipio de Matamoros, Coahuila. (a) Curvas de nivel y la presencia de ríos; (b) perfiles topográficos en diferentes sentidos.

3.3. Validación de los mapas

Los mapas que muestran las reservas de COS y CIS (Figuras 5a y 5b, respectivamente) tuvieron precisiones parecidas en lo general (Tabla 5), aunque con ligeras diferencias,

como se observa en los parámetros del error en la validación cruzada. Las RCME muestran que los valores predichos son mayores que las cantidades que se obtuvieron en campo para COS y CIS (0.6951 y 0.6461 Mg ha⁻¹, respectivamente); esto revela que los valores predichos podrían subestimar o sobreestimar los datos de campo. En cambio, los EMS de la verificación indican que los mapas de COS sobreestimaron los datos (-0.1827 Mg ha⁻¹); mientras que, el CIS subestimó los valores de campo (0.0463 Mg ha⁻¹); aunque en los puntos de verificación específicamente, tanto para COS como para CIS en ocasiones se subestimaron o sobreestimaron los almacenamientos de campo.

Cuadro 5. Verificación de los mapas temáticos de COS y CIS predichos con los resultados de los contenidos de COS y CIS del segundo muestreo.

No.	UTM		COS _p [†]	CIS _p	COS _m	CIS _m	RCME _{cos}	EMS _{cos}	RCME _{cis}	EMS _{cis}
	X	Y								
1	678077.91	2813794.18	3.72	26.66	4.10	25.75	0.1454	0.38	0.8197	-0.91
2	668791.06	2813483.92	3.37	20.35	3.35	19.86	0.0006	-0.02	0.2353	-0.49
3	688706.19	2810484.71	4.04	26.54	3.54	27.01	0.2463	-0.50	0.2245	0.47
4	673228.11	2822584.97	4.21	16.89	3.83	16.98	0.1475	-0.38	0.0079	0.09
5	675601.42	2820930.28	4.29	19.79	4.01	20.11	0.0777	-0.28	0.1010	0.032
6	666314.57	2845441.03	5.15	11.37	4.11	11.19	1.0841	-1.04	0.0320	-0.18
7	672608.99	2834892.08	4.68	13.43	4.33	14.67	0.1237	-0.35	1.5438	1.24
8	676942.85	2826101.29	4.33	15.35	3.84	15.33	0.2357	-0.49	0.0003	-0.02
9	685549.37	2827957.48	3.51	12.90	4.25	13.84	0.5539	0.74	0.8749	0.94
10	694691.05	2834788.66	2.90	15.92	2.51	15.53	0.1483	-0.39	0.1507	-0.39
11	680564.61	2838924.48	4.52	13.18	3.68	13.48	0.7115	0.16	0.0926	0.30
12	687880.69	2835202.34	3.23	12.60	3.69	13.54	0.2094	0.46	0.8777	0.94
13	666314.57	2839959.71	5.30	11.80	4.00	11.26	0.2869	-0.32	0.2868	-0.54
14	678077.91	2849681.29	4.93	11.53	3.45	11.15	2.1893	-1.48	0.1460	-0.38
15	675085.48	2812449.71	3.14	25.78	3.45	26.17	0.0955	0.31	0.1556	0.39
16	690666.78	2818241.29	4.61	23.22	4.88	22.16	0.0736	0.27	1.1284	-1.69
							0.6951	-0.1827	0.6461	0.0463

[†]COS_p: carbono orgánico del suelo predicho, CIS_p: carbono inorgánico del suelo predicho, COS_m: carbono orgánico del suelo segundo muestreo, CIS_m: carbono inorgánico del suelo segundo muestreo; RCME: raíz cuadrada media del error, EMS: error medio del sesgo.

4. Discusión

4.1. Variabilidad espacial del carbono

El comportamiento de la semivarianza de COS, CIS y CTS y el ajuste del modelo esférico a los datos de los variogramas de este estudio, concuerdan con la distribución espacial de características edáficas (carbono orgánico, carbonatos, materia orgánica, pH, Ca, P), reportadas en diferentes trabajos. En ellos se demuestra que, los modelos esféricos tienen un mejor ajuste a los datos (Jaramillo, 2012; Bhunia *et al.*, 2016; Sreenivas *et al.*, 2016, Henríquez *et al.*, 2013). Los nugget más bajos que los sill, revelaron una estructura espacial (PingguoYang *et al.*, 2016), lo que refleja que los datos obtenidos en los muestreos son representativos de las variaciones espaciales (Axis-Arroyo *et al.*, 2003). No obstante, la variabilidad espacial o estructural de CIS demuestra una mayor representatividad espacial que la presentada por COS, lo que indica que CIS sería espacialmente más predecible (Gallardo, 2006). Otro aspecto, los rangos de dependencia para cada variable, al resultar mayores que los distanciamientos de muestreo, revelan una relación espacial de sus muestras. Ello sugiere un efecto de autocorrelación fuerte que puede deberse a algún factor de gran influencia (mayor a la distancia de muestreo) en el área de estudio, como lo indican Villatoro *et al.* (2008); que podría surgir de las características del suelo y de su manejo (Haws *et al.*, 2004). Al considerar lo anterior y lo reportado acerca del material parental (Czaja *et al.*, 2014), vegetación (INEGI, 2010), la fisiografía (Mejía-González *et al.*, 2014) y el clima (Figura 2) del área de estudio, el comportamiento de la variabilidad espacial de CIS podría deberse a estos factores formadores del suelo; en cambio, en COS de acuerdo a la Tabla 2, la variabilidad se debería principalmente, al uso del suelo (agrícola y sin uso aparente) y el manejo del mismo (intensivo con y sin enmiendas orgánicas) que se identificaron en el área, ya que en entre puntos de muestreo hubo diferencias. Por otra parte, el grado de dependencia

espacial o correlación de los datos fue clasificado por Cambardella *et al.* (1994) en tres grupos: fuerte (< 25%), moderada (25-75%) y débil (> 75%). La moderada dependencia espacial de CIS sugiere su correlación con otras características del suelo o el ambiente, como lo señalan PingguoYang *et al.* (2016); mientras que la débil dependencia espacial del COS fue reportada por Urricariet *et al.* (2011) y Delgado-Carranza *et al.* (2017) en estudios de distribución de carbono en suelos. Al respecto, Chien *et al.* (1997) mencionaron que el uso y manejo del suelo, aparte del tipo de suelo y clima, son factores que debilitan la dependencia espacial; de tal manera que, la intervención de los humanos en la naturaleza provoca una disminución de la dependencia espacial del COS (Sun *et al.*, 2003). La influencia del humano en el área de estudio, se constató al identificar en la mayoría de los sitios de muestreo (Tabla 2) un uso agrícola con manejos diferentes (agua de riego, aplicación de fertilizantes, con o sin aplicaciones de enmiendas orgánicas, con uno o dos ciclos de cultivo anual), incluso en descanso, y por otra parte sitios sin uso aparente, con lo que se verificó la correspondencia entre los almacenes de COS y el manejo. Lo anterior permite deducir que el humano, como factor formador del suelo (Dudal, 2004), debilita o disminuye la dependencia espacial o la correlación de los datos de carbono, principalmente en regiones donde se encuentren tanto áreas naturales sin uso aparente como con actividades agrícolas; siendo más evidente en el COS que en el CIS, como se encontró en nuestro estudio. En relación a la varianza explicada por el espacio o grado de variación espacial, Gallardo (2006) indicó que valores altos de esta varianza, revelan que las variables en estudio pueden ser predecibles espacialmente y el grado de incertidumbre al momento de interpolar los datos es menor. De acuerdo con lo anterior, el CIS y el CTS serían espacialmente predecibles con un grado de incertidumbre bajo, pero no tanto en COS (Tabla 3); esto podría explicar las diferencias en los coeficientes de

determinación de los modelos de predicción obtenidos en las validaciones cruzadas. Trabajos anteriores indicaron que la principal fuente de incertidumbre es la variabilidad en las reservas de COS, debida a errores en las determinaciones en laboratorio (Minasny *et al.*, 2013), así como la variabilidad de los suelos y el contenido de fragmentos de roca (Goidts *et al.*, 2009). En nuestro caso, como se mencionó anteriormente, la actividad humana a través del manejo del suelo, diferente en cada sitio, es otra fuente de incertidumbre, ya que influye principalmente en la variabilidad espacial del COS; mientras que, en el CIS depende de los factores formadores del suelo (material parental, clima, vegetación y relieve) y sus relaciones, entendiendo éstas como los procesos formadores del suelo o procesos pedogenéticos como sería la carbonatación. Este proceso es la acumulación pedogenética de carbonatos en el suelo, que dependen del clima y el estado de desarrollo de los suelos (Raheb *et al.*, 2017). En suelos de regiones áridas acumula carbonatos pedogenéticos de sedimentos no calcáreos, donde se combinan iones alcalinotérreos (Ca^{2+} y Mg^{2+} , principalmente), que provinieron de la disolución de minerales primario, con agua de lluvia y CO_2 de la respiración de las plantas (Drees *et al.*, 2001) y se acumulan en las capas superficiales y subsuperficiales del suelo por la alta evaporación que existe en esas regiones (Cox, 2012); mientras que, el relieve o fisiografía puede influir en su distribución. Este proceso puede acelerarse en suelos irrigados y cultivados (Sanderman, 2012) en esos climas. Por otra parte, los errores y la incertidumbre en el CTS se debieron a la manera como se obtuvieron sus valores, ya que fue resultado de una suma aritmética de COS y CIS, lo que provocó que CTS acumulara los errores en las estimaciones de estos últimos.

4.2. Distribución del carbono del suelo

Los mayores almacenes de COS, así como las menores de CIS, en algunos sectores del área agrícola se relacionaron con los sitios de prácticas de manejo con aplicación de enmiendas orgánicas de estiércol (Tabla 2); prácticas que de acuerdo con Fortis-Hernández *et al.* (2009), aplican hasta 120 Mg ha⁻¹ de estiércol. No obstante, los contenidos de COS fueron bajos en comparación con otras regiones áridas del mundo (Díaz-Hernández *et al.*, 2003; Elbasiouny *et al.*, 2014). Lents y Lersch (2014) concluyeron que la adición de estiércol aumenta el almacenamiento de carbono en el corto plazo. Aunque, el manejo tradicional provoca la baja acumulación de carbono orgánico a largo plazo (Flores-Sánchez *et al.*, 2015), ya que la degradación física causada por la labranza rompe los agregados y promueve la pérdida de COS (Pagliai *et al.*, 2004) o como lo sugieren Raheb *et al.* (2017), el COS agregado puede decaer rápidamente, por su descomposición promovida por la actividad de los microorganismos, y parte se convierte a CIS por reacciones químicas subsecuentes. Situación que no ocurre en las áreas sin uso aparente, donde la vegetación de tipo matorral y las condiciones de aridez de la zona (INEGI, 2016; Montaña *et al.*, 2016), intervienen en la baja acumulación de COS. En contraste, la distribución del CIS está influenciada por las condiciones climáticas, aunque son una constante por encontrarse el área de estudio en un clima árido, determina la acumulación de carbonatos; mientras que, el material parental constituido de sedimentos aluviales (minerales de origen ígneo y sedimentario), a través de su alteración contribuyen con elementos alcalinotérreos que por reacciones químicas (carbonatación) pueden formar carbonatos. Asimismo, la fisiografía, representada por la ubicación de los abanicos aluviales y las llanuras de inundación de los ríos Nazas y Aguanavala (Figura 3b) a diferentes altitudes (Figura 6), fue uno de los factores que más influyó en la distribución de los almacenes de CIS; ya que, en función del caudal de los ríos, el depósito de las

partículas que transportaban, fue en estas geoformas, como lo reveló la presencia de arenas medias y finas en el abanico aluvial del río Aguanaval. Tomando como base un trabajo previo (Czaja *et al.*, 2014) y la Figura 3a, corrientes fluviales del Nazas y el Aguanaval desembocaban en el Paleolago Irritila; de tal manera que, la acumulación de carbonatos pudo deberse a su origen aluvial, lacustre o pedogenético, como se ha reportado en otras cuencas endorreicas de México y del mundo (Gutiérrez *et al.*, 1998; Raheb *et al.*, 2017), aspectos que en nuestro estudio no se determinaron. Sin olvidar, el factor humano que, por sus actividades agrícolas intensivas como la adición de fertilizantes sintéticos, enmiendas orgánicas e incluso la calidad del agua de riego como se presentaron en el área de estudio (Tabla 2), pueden inducir la modificación de los almacenes de CIS, como lo han indicado varios autores (Sartori *et al.*, 2007; Sanderman, 2012; Lents y Lersch, 2014) y que no se revisaron en nuestra investigación. Por otra parte, el aporte del CIS (79%) a las reservas de carbono total del suelo y la correlación con tendencia negativa con respecto a COS, fueron similares a las tendencias y aportes reportados en otras regiones áridas y semiáridas del mundo, donde el CIS contribuye con 84 y 74%, respectivamente (Raheb *et al.*, 2017). Lo anterior permite deducir que la capacidad de reserva de un suelo determinado, podría presentar un límite de manera natural en regiones áridas, donde la disminución o aumento de un tipo de reserva (COS o CIS) se compensa con el otro a través del tiempo, siempre y cuando no intervenga el humano; de tal manera que, para asegurar la permanencia o incremento de las reservas de carbono en el suelo, debería conocerse el origen y acumulación de COS y CIS, así como considerarse el tipo y calidad de las enmiendas orgánicas y el manejo o labranza que se utilicen en el lugar. Sin embargo, información relacionada con este aspecto es escasa, en regiones áridas.

4.3. Validación de los mapas temáticos de carbono

Existen pocos estudios donde se valida la precisión de los mapas de carbono del suelo utilizando un método de muestreo aleatorio simple estratificado (Minasny *et al.*, 2013). Brus *et al.* (2011) indicaron que el muestreo aleatorio simple estratificado es una buena opción para la verificación de la precisión de los mapas, ya que puede aumentar la precisión de las medidas estimadas de la calidad del mapa. En este sentido, el desempeño de un modelo en un periodo de tiempo dado se obtiene a través del RCME (Douglas *et al.*, 2009) y su valor es siempre positivo (Yapo *et al.*, 1998); mientras que el EMS proporciona información del comportamiento a largo plazo de las correlaciones, lo que permite una comparación de la desviación real entre los valores pronosticados y medidos, término a término (Gunhan *et al.*, 2005). De acuerdo con lo anterior, el mapa de CIS de nuestra investigación tuvo menor error y fue más preciso que el de COS, lo que fortalece los resultados que se encontraron en el análisis estructural de los almacenes de carbono.

4. Conclusiones

La distribución espacial de los almacenes de COS y CIS en la Comarca Lagunera, se logró establecer con datos georreferenciados de muestras de suelo y la aplicación del método geoestadístico kriging ordinario, con lo que se generaron modelos de predicción de las reservas de carbono. Asimismo, las distribuciones espaciales de los almacenes de COS y CIS se relacionaron con los factores formadores del suelo para explicar su distribución. Los almacenes de carbono inorgánico de los suelos (CIS) de Matamoros, Coahuila, aportan una proporción de 79% al almacén de carbono total del suelo (CTS), cifra mayor a la que contribuye el carbono orgánico del suelo (COS), en este municipio. Asimismo, el análisis estructural de los almacenes de COS y CIS, reveló que el CIS es más predecible

espacialmente, ya que el grado de variación espacial (73.40%) fue mayor que en COS (17.56%), por lo que el modelo de predicción de CIS tuvo un error menor que COS después de las validaciones cruzadas correspondientes (2.0158 y 4.6597, respectivamente), como se constató con la validación de estos modelos con datos reales. Los mapas de predicción mostraron la distribución espacial de las reservas de las fracciones de carbono. La distribución de COS está relacionada con el factor humano que interviene en áreas agrícolas a través del manejo, lo que influye directamente en su baja estructura espacial. En cambio, la distribución del CIS se relacionó principalmente con los factores formador del suelo como la fisiografía, material parental y clima, ya que las reservas de CIS más grandes ($> 27 \text{ Mg ha}^{-1}$) se encontraron en suelos de sedimentos gruesos sin uso aparente y con vegetación de matorral, que se ubicaron en el abanico aluvial del río Aguanaval; mientras que, los almacenes con menores reservas se ubicaron en la parte norte, sobre las llanuras de inundación del río Nazas, en sitios con actividad agrícola intensiva. Finalmente, la relevancia de esta investigación radicó en el establecimiento de la distribución espacial del COS y del CIS en una zona árida de México y su relación con los factores formadores del suelo. No obstante, diferentes preguntas surgieron al concluir este trabajo como ¿los suelos de regiones áridas tienen una máxima capacidad de reserva de carbono o es infinita? ¿cuál es el origen de los carbonatos en esta región? ¿aluvial, lacustre o pedogenético? ¿cuáles son los mecanismos a utilizar para asegurar primero la permanencia de las fracciones de carbono en el suelo y después el incremento en aquellos suelos de uso agrícola? Entre algunas otras, lo que lleva a concluir que, se requiere de más investigación en las regiones áridas, para generar información que ayude a determinar el tipo de prácticas amigables para conservar el COS de los suelos, sin

alterar el equilibrio entre los contenidos de COS y CIS e incluso que permita el incremento de las reservas de carbono.

5. Agradecimientos

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Torreón por el apoyo brindado para el uso de laboratorios y realización de análisis químicos, siendo este trabajo parte del proyecto 5654.15-P. Asimismo, se agradece a los revisores anónimos, así como al editor por sus comentarios y sugerencias que sin duda enriquecieron este documento.

6. Referencias bibliográficas

- Axis-Arroyo, J., Mateu, J., Torruco, D., 2003, Diferencias entre modelos geoestadísticos aplicados en el análisis de la distribución espacio-temporal de especies biológicas, en: Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries 54: Islas Turcas y Caicos, Reino Unido, Gulf and Caribbean Fisheries Institute, 550-565.
- Batjes, N. H., 1999, Management options for reducing CO₂ concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil: Wageningen, International Soil Reference and Information Centre, 200 p.
- Bhunja, G.S., Shit, P.K., Maiti, R., 2016, Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon (SOC): Journal of the Saudi Society of Agricultural Science. In Press. doi.org/10.1016/j.jssas.2016.02.001
- Brus, D.J., de Gruijter, J.J., 2011, Design-based generalized least squares estimation of status and trend of soil properties from monitoring data: Geoderma, 164, 172-180.

- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen D.L., 1994, Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils: *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1501-1511.
- Chien, Y.J., Lee, D.Y., Guo, H.Y., Hwang, K.H., 1997, Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils: *Soil Science*, 162, 291-298.
- Cox, C.L., 2012, Evaluation of soil sustainability along the Rio Grande in West Texas: changes in salt loading and organic nutrients due to farming practices: University of Texas at El Paso, El Paso, TX, 48 p.
- Cruz, C., Paz, F., 2013, Mapa de carbono orgánico de los suelos de la República Mexicana, In: Paz, F., Bazan, M., Saynes, V. (eds.), *Dinámica del Carbono en el Suelo 2012: Texcoco, Estado de México, Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Sociedad Mexicana de Ciencias del Suelo*, 187-191 p.
- Czaja, A., Palacios F., M.R., Estrada R., J.L., Romero M., U., Alba Á., J.A., Inland dunes fauna and flora from Paleolake Irritila in the Comarca Lagunera, Coahuila, northern Mexico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 541-551.
- Delgado-Carranza, C., Bautista-Zuñiga, F., Calvo-Irabien, L.M., Aguilar-Duarte, Y.G., Martínez-Téllez, J.G., 2017, El carbono orgánico en Leptosols con distribución discontinua en la península de Yucatán: *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4, 31-38.
- Díaz-Hernández, J.L., Barahona F.E., 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, 65-80.

- Douglas, E.M., Jacobs, J.M., Sumne, D.M., Ray, R.L., 2009, A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types: *Journal of Hydrology*, 373, 366-376.
- Drees, L.R., Wilding, L.P., Nordt, L.C., 2001, Reconstruction of soil inorganic and organic carbon sequestration across broad geoclimatic region. In Lal, R. (ed), *Soil carbon sequestration and the greenhouse effect: Wisconsin*, Soil Science Society American, 155-172 p.
- Dudal, R., 2005, The sixth factor of soil formation: *Eurasian Soil Science c/c of Pochvovedenie*, 38, S60.
- Eastman, J.R., 2013, *IDRISI Guide to GIS and Image Processing in Idrisi Selva: Worcester*, Clark University, 306 p.
- Elbasiouny, H., Abowaly, M., Alkheirb, A.A., 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., Van den Bygaart, A.J., Bremer, E., 2006, Measuring change in soil organic carbon storage, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton, CRC Press, 25-38 p.
- ESRI, 2014, *ArcGis 10.3. Working with the ArcMap Spatial Analyst: California*, ESRI Educational Services.
- Etchevers, J.D., Maser, O., Balbontín, C., Gómez, D., Monterroso, A., Martínez, R., Acosta, M., Martínez, M., Ortiz, C., 2006, Soil carbon sequestration in Mexico and Central America (Biome A): in: Lal, R., Cerri, C.C., Bernoux, M., Etchevers, J., Cerri, E. (eds.), *Carbon Sequestration in Soils of Latin America: New York*, Howarth Press, 119-146 p.

- Flores-Sánchez, B., Segura-Castruita, M.A., Fortis-Hernández, M., Martínez-Corral, L., Aldaco-Nuncio, R.A., Orozco-Vidal, J.A., 2015, Enmiendas de estiércol solarizado en la estabilidad de agregados de un Aridisol cultivado de México: *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1543-1555.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2002, *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*: Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 61 p.
- Fortis-Hernández., 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., Vázquez V., C., (eds), *Libro de Agricultura Orgánica: Gómez Palacio, FAZ-UJED*, 104-127 p.
- Gallardo, A., 2006, *Geoadfística: Ecosistemas*, 15, 48-58.
- García, E., 2004, *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: México D.F.*, Instituto de Geografía, UNAM, 98 p.
- Goidts, E., Van Wesemael, B., Crucifix, M., 2009, *Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales*: *European Journal of Soil Science*, 60, 723-739.
- Gunhan, T., Demir, V., Hancioglu, E., Hepbasli, A., 2005, *Mathematical modeling of drying of bay leaves*: *Energy Conversion Management*, 46, 1667-1679.
- Guo, Y., Amundson R., Gong, P., Yu Q., 2006, *Quantity and Spatial Variability of Soil Carbon in the Conterminous United States*. *Soil Science of American Journal*, 70: 590-600.

- Gutiérrez C., M.C., Stoops G., G., Ortis S., C.A., 1998, Carbonato de calcio en los suelos del Ex Lago de Texcoco: Terra, 16, 11-19.
- Haws, N.W., Liu, B., Boast, C.W., Rao, P.S.C., Kladivko, E.J., Franzmeier, D.P., 2004, Spatial variability and measurement scale of infiltration rate on an agricultural landscape: Soil Science Society of America Journal, 68, 1818-1826.
- Henríquez, C., Méndez, J.C., Masís, R., 2013, Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el análisis kriging y su validación: Agronomía Costarricense, 37, 71-82.
- Horton, J.H., Newsom, D.W., 1953, A rapid gas evolution method for calcium carbonate equivalent in liming materials: Soil Science Society of America Journal, 17, 414-415.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2016, Sistema de descarga de productos digitales, disponible en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/> consultado 31 enero 2016.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2016, Sistema de descarga de productos digitales, disponible en <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/topografico/> consultado 04 febrero 2016.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática (INEGI), 2010, Carta Uso de Suelo y Vegetación Torreón G13-9, escala 1:250,000: México, D.F., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1 Mapa.
- International Institute for Applied Systems Analysis/Food and Agriculture Organization (IIASA/FAO), 2012, Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0): Rome, International Institute for Applied Systems Analysis and FAO, 179 p.

- Jaramillo, D.F., 2012, Variabilidad espacial del suelo, bases para su estudio: Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, 1, 73-87.
- Lentz, R.D., Lehrsch, G.A., 2014, Manure and fertilizer effects on carbon balance and organic and inorganic carbon losses for an irrigated cornfield: Soil Science Society of America Journal, 78, 987-1002.
- Liu, D., Wang, Z., Zhang, B., Song, K., Li, X., Li, J., Li, F., Duan, H., 2006, Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factor sincroplands of the black soil region, Northeast China: Agriculture, Ecosystems and Environment, 113, 73-81.
- Luo, Y., Durenkamp, M., De Nobili, M., Lin, Q., Brookes, P.C., 2011, Short term soil priming effects and the mineralisation of biochar following its incorporation to soils of different pH: Soil Biology and Biochemistry, 43, 2304-2314.
- Mejía-González, M.Á., González-Hita, L., Briones-Gallardo, R., Cardona-Benavides, A., Soto-Navarro, P., 2014, Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México: Tecnología y Ciencias del Agua, 5, 71-82.
- Minasny, B., McBratney, A.A., Malone, B.P., Wheeler, I., 2013, Digital mapping of soil carbon: Advances in Agronomy, 118, 4-51.
- Minitab Inc®, 2013, Minitab Inc.: State Collage, Minitab Inc.
- 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., Yépez, E., 2016, Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México, Síntesis y perspectivas: Terra Latinoamericana, 34, 39-59.

- Orton, T.G., Pringle, M.J., Bishop, T.F.A., 2016, A one-step approach for modelling and mapping soil properties based on profile data sampled over varying depth intervals: *Geoderma*, 262, 174-186.
- Paz, F., Covalada, S., Hidalgo, C., Etchevers, J., Matus, F., 2016, Modelación simple y operativa de la distribución del carbono orgánico por fracciones físicas en los suelos: *Terra latinoamericana*, 34, 321-327.
- Paz-Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C., Etchevers-Barra, J., 2012, Análisis y modelación de las energías de dispersión en la distribución del carbono orgánico en los suelos por fracciones físicas, en: Paz, F. y Cuevas, R., (eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011*: Texcoco, Estado de México, Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología, 240-247 p.
- PingguoYang, Birne, J.M., Yang, M., 2016, Spatial variability of soil magnetic susceptibility, organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China: *Catena*, 145, 92-98.
- Plagiai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2004, Soil structure and the effect of management practices: *Soil and Tillage Research*, 79, 131-143.
- Raheb, A., Heidari, A., Mahmoodi, S., 2017, Organic and inorganic carbon storage in soils along an arid to dry sub-humid climosequence in northwest of Iran. *Catena*, 153: 66-74.
- Sanderman, J., 2012, Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agriculture: Ecosystems and Environment*, 155, 70-77.

- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M.H., Eaton, J.A., 2007, Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in Columbia Plateau, Oregon, USA: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 122, 325-339.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2002, Norma Oficial Mexicana, que establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreos y Análisis (NOM-021-RECNAT-2000): México D.F., Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre, 2002, 85 p.
- Segura-Castruita, M.A., Huerta-García, A., Fortis-Hernández, M., Montemayor-Trejo, J.A., Martínez-Corral, L., Yescas-Coronado, P., 2014, Cartografía de la probabilidad de ocurrencia de *Atriplex canescens* en una región árida de México: *Agrociencia*, 48, 639-652.
- Segura-Castruita, M.A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C., 2005, Carbono orgánico de los suelos de México: *Terra Latinoamericana*, 23, 21-28.
- Singh, S.K., Singh, A.K., Sharma, B.K., Tarafdar, J.C., 2007, Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India: *Journal of Arid Environment*, 68, 408-421.
- Soil Survey Staff (SSS), 2014, Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.): Nebraska, Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 1001 p.
- Sreenivas, K., Dadhwal, V.K., Kumar, S., Harsha, G.S., Mitran, T., Sujatha, G., Janiki, G.R.S., Fyzee, M.A., Ravisankar, T., 2016, Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India: *Geoderma*, 269, 160-173.

- Sun, B., Shenglu, Z., Zhao, Q., 2003, Evaluation of temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China: *Geoderma*, 115, 85-99.
- Urricariet, S., Niborski, M., Kvolek, C.M., 2011, Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa: *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 29, 49-59.
- Villatoro, M., Henríquez C., Sancho, F., 2008, Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo: *Agronomía Costarricense*, 32, 95-105
- Walkley, A., 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 Science*, 37, 29-38
- West, O., Marland, G., 2002, A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States: *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 91, 217-232.
- Yapo, P.O., Gupta, H.V., Sorooshian, S., 1998, Multi e objective global optimization for hydrologic models: *Journal of Hydrology*, 204, 83-97.

ANÁLISIS TEMPORAL DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO EN UNA REGIÓN ÁRIDA DE MÉXICO

Temporal analysis of organic carbon content of soil in an arid region of Mexico

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

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna-Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias, 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. C.P. 27170. Tel. 871 750 7198 (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 (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx). [§]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 geostatístico 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 $ICK = 0.10$, 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: COS, cartografía, Kappa

Abstract

The content and behavior of soil organic carbon (SOC) in arid regions over time are unknown, even though the amendments of cattle manure in these soils have become important in the extensive agricultural systems of these regions, there is no information that reveals the changes in the status of the SOC. For this reason, the objectives of this research were to establish the distribution of SOC content of the municipality of Matamoros, Coahuila and to determine the changes in its concentration over time. Soil samples from the surface layer (0-30 cm) in the year

2015, were collected to estimate the content of SOC. These data and their georeferences, were used to perform an interpolation with the Ordinary Kriging geostatistical method and to obtain a thematic map of SOC distribution. In addition, base data of SOC of the year 2002, was acquired from a previous work and used to obtain another thematic map of the municipality. The maps were compared with a cross-reference table and the Kappa concordance index (KCI). The results showed that the maps are not equal, as confirmed by the $KCI = 0.10$, such that in 13 years the SOC increased by 65 511.88 Mg. The determination of the SOC content and the establishment of its spatial distribution, as well as its comparison with existing SOC data and base maps, allowed for changes in SOC contents over time.

Keywords: SOC, cartography, Kappa

Introducción

El sistema suelo-vegetación juega un papel importante en el aumento o la reducción de las concentraciones de CO_2 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 CO_2 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 (D_a) 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, Montaña 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 Matamoros, 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 Matamoros (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 2500 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).

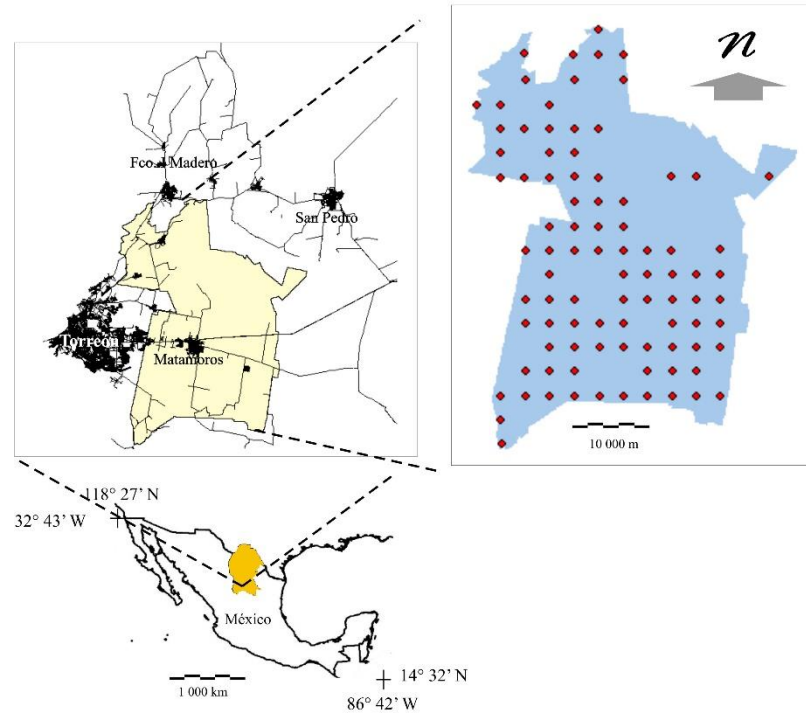


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de sitios de muestreo.

Métodos

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.

Aparte, 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 Da 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	<i>N</i> *	\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 que se encontró en el 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). Montañó et al. (2016), indicaron que este tipo de vegetación es común en los climas que prevalecen en las 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 los menores contenidos se encuentran al noreste entre los cerros que se encuentran en Matamoros y en la parte sur del municipio (Figura 2).

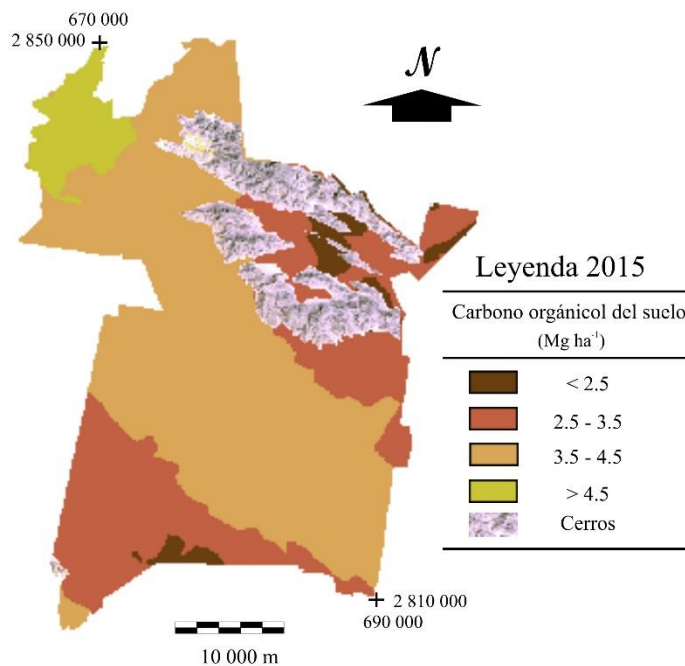


Figura 2. Distribución espacial de los contenidos de carbono orgánico de los suelos del municipio de Matamoros, Coahuila.

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; Montaña 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

Clase	COS 2015	
	Área	Contenido
Mg ha ⁻¹	Ha	Mg
< 2.5	4 128.84	10 322.10
2.5 -3.5	25 920.38	77 761.14
3.5 – 4.5	46 257.55	185 030.20
> 4.5	4 492.44	20 215.98
Total	80 799.21	293 329.42

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

El mapa temático que se obtuvo a partir de los datos de COS del 2002 y las georreferencias que reportaron Segura-Castruita et al. (2005), es diferente (Figura 3) al que se obtuvo para 2015; ya que para el 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.

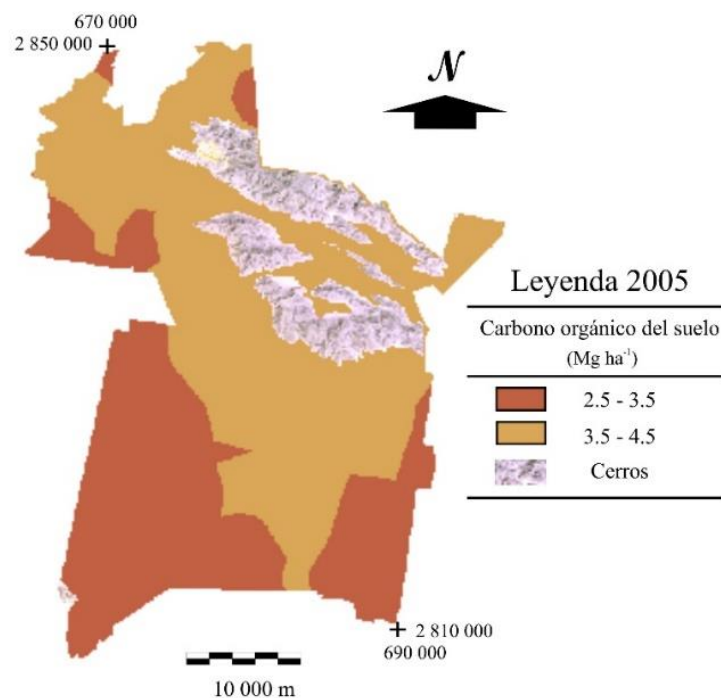


Figura 3. Distribución de los contenidos de carbono orgánico del suelo de la capa superficial de Matamoros, Coahuila (adaptado de Segura et al., 2005)

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 (0.10) 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).

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 disminuyó para el 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 el 2002 no existía (Cuadro 3).

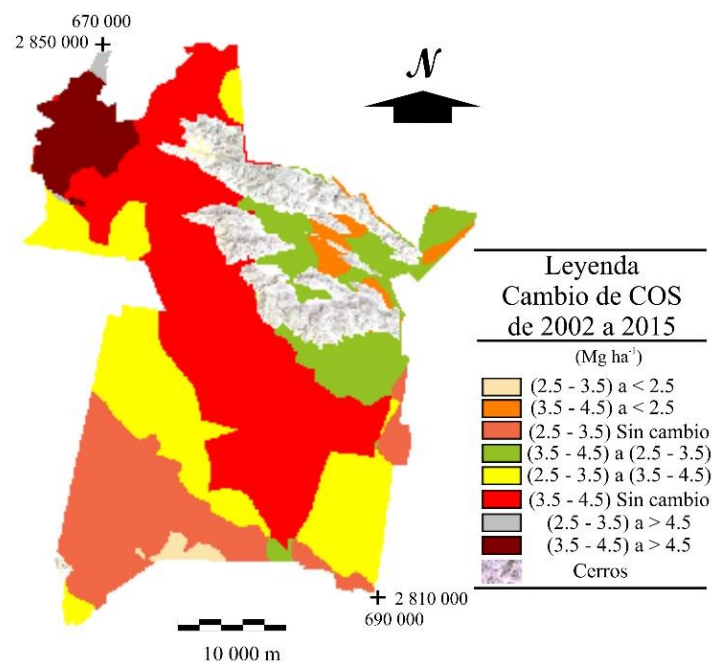


Figura 4. Mapa de cambios de los contenidos de carbono orgánico del suelo entre los años 2002 y 2015, en el municipio de Matamoros, Coahuila.

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. Da 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 ($>4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$) 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 ($<2.5 \text{ Mg ha}^{-1}$) 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 el 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, con el fin de hacer eficiente este tipo de 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-Cardenas, G., Ortiz-Solorio, C. A., Ojeda-Trejo, E., Martínez-Montoya, J. F., Sotelo-Ruiz, E. D. and Licona-Vargas, A. L. (2010). Evaluation of four digital classifiers for automated cartography of local soil classes based on reflectance and elevation in Mexico. *International Journal of Remote Sensing.* 31(3): 665-679.

- Díaz-Hernández, 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 (Food and Agricultural Organization). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos. Reporte 96. Roma, Italia.
- Flores-Sánchez, B.; Segura-Castruita, M. A.; Fortis-Hernández, M.; Martínez-Corral, L.; Aldaco-Nuncio, R. A. y Orozco-Vidal, J. A. 2015. Enmiendas de estiércol solarizado en la estabilidad de agregados de un Aridisol cultivado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(7): 1543-1555.
- Fortis-Hernández, 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, UNAM. D.F. México. 98 p.

- Heuscher, S. A.; Brandt, C. C. and Philip, M.J. 2005. Using Soil Physical and Chemical Properties to Estimate Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*. 69(1): 51-56.
- Holland, J. M. 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 103(1): 1-25.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Kanagawa, Japan
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2016. Sistema de descarga de productos digitales. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/> (Consulta: enero 2017).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2016. Sistema de descarga de productos digitales. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/topografico/> (Consulta: enero 2017).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2010. 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 Lehrsch, G. A. 2014. Manure and fertilizer effects on carbon balance and organic and inorganic carbon losses for an irrigated cornfield. *Soil Science Society of America Journal*. 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 Biology and Biochemistry*. 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 Latinoamericana*. 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*. 195-196: 201-206.
- Paz-Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C. y Etchevers-Barra, 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-Castruita, M. A.; Sánchez-Guzmán, P.; Ortiz-Solorio, C. A. y Gutiérrez-Castorena, M. C. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*. 23(1): 21-28.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2000. 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. Tomo

DLXV-12: 6-74. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos.
Talleres Gráficos de México. México, D.F.

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 Journal of the Human Environment.* 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 Science.* 37(1): 29-38

CONCLUSIONES GENERALES

La distribución espacial de los almacenes de COS y CIS en la Comarca Lagunera, se logró establecer con datos georreferenciados de muestras de suelo y la aplicación del método geoestadístico kriging ordinario, con lo que se generaron modelos de predicción de las reservas de carbono.

Asimismo, las distribuciones espaciales de los almacenes de COS y CIS se relacionaron con los factores formadores del suelo para explicar su distribución. Los almacenes de carbono inorgánico de los suelos (CIS) de Matamoros, Coahuila, aportan una proporción de 79% al almacén de carbono total del suelo (CTS), cifra mayor a la que contribuye el carbono orgánico del suelo (COS), en este municipio.

El análisis estructural de los almacenes de COS y CIS, reveló que el CIS es más predecible espacialmente, ya que el grado de variación espacial (73.40%) fue mayor que en COS (17.56%), por lo que el modelo de predicción de CIS tuvo un error menor que COS después de las validaciones cruzadas correspondientes (2.0158 y 4.6597, respectivamente), como se constató con la validación de estos modelos con datos reales.

Los mapas de predicción mostraron la distribución espacial de las reservas de las fracciones de carbono. La distribución de COS está relacionada con el factor humano que interviene en áreas agrícolas a través del manejo, lo que influye directamente en su baja estructura espacial. En cambio, la distribución del CIS se relacionó principalmente con los factores formador del suelo como la fisiografía, material parental y clima, ya que las reservas de CIS más grandes ($> 27 \text{ Mg ha}^{-1}$) se encontraron en suelos de sedimentos gruesos sin uso aparente y con vegetación de matorral, que se ubicaron en el abanico aluvial del río Aguanaval; mientras que, los almacenes con menores reservas se ubicaron en la parte norte, sobre las llanuras de inundación del río Nazas, en sitios con actividad agrícola intensiva.

Finalmente, la relevancia de esta investigación radicó en el establecimiento de la distribución espacial del COS y del CIS en una zona árida de México y su relación con los factores formadores del suelo.

No obstante, se requiere de más investigación en las regiones áridas, para generar información que ayude a determinar el tipo de prácticas amigables para conservar el COS de los suelos, sin alterar el equilibrio entre los contenidos de COS y CIS e incluso que permita el incremento de las reservas de carbono en estas regiones.