

Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México

Recibido: 13 de enero de 2011. Aceptado en versión final: 27 de julio de 2011.

Gilberto Vela Correa*

Jorge López Blanco**

María de Lourdes Rodríguez Gamiño***

Resumen. El Suelo de Conservación (SC) del Distrito Federal es un reservorio de carbono, por lo que es importante contar con datos sobre su capacidad de almacenamiento bajo diferentes tipos de cobertura vegetal. En este trabajo se estimó el contenido de carbono orgánico total en suelos (COS) de áreas con cobertura de bosque, uso agrícola y en áreas reforestadas. Se delimitaron unidades geomorfogenéticas que sirvieron de base para el muestreo de suelos. En total se estudiaron 50 sitios con muestras de suelo tomadas a una profundidad de 0-30 cm con diferente cobertura vegetal. Se determinó la cantidad de carbono orgánico total en el suelo por hectáreas (COS) a partir de una ecuación que considera la densidad aparente, porosidad y superficie. El mayor contenido de COS se presentó en los suelos de sitios reforestados

con *Abies religiosa*, *Pinus* spp., y *Pinus-Cupressus*. Los suelos agrícolas contienen menos de la mitad de COS que los suelos forestales. Los contenidos más altos de COS se localizan en la Sierra de las Cruces y Sierra de Guadalupe, así como en los suelos de los volcanes Pelado, Cuautzin y Tláloc. Las delegaciones cuyos suelos tienen mayor contenido de COS son Cuajimalpa y Magdalena Contreras. Es necesario evaluar, desde una perspectiva económico-ambiental, los servicios ecosistémicos que ofrece el SC, en este caso como almacén de carbono en el suelo, a fin de que los estímulos económicos sean atractivos para los poseedores de la tierra.

Palabras clave: Cambio climático, carbono orgánico total, Suelo de Conservación, carbono en suelos, Distrito Federal.

Levels of total organic carbon in The Suelo de Conservación of the Distrito Federal, Central Mexico

Abstract. The Suelo de Conservación (SC) of the Distrito Federal (Central Mexico) is a reservoir of carbon, so it is important to have storage-capacity data under different types of vegetation. In this paper we estimated the total organic carbon content in soils (TOCS) of land cover areas of forest, forested areas and agricultural use. Geomorphogenetic units were delineated that were the basis for soil sampling. In total 50 sites were considered with soil samples taken at a

0-30 cm depth with different land cover. We determined the total amount of organic carbon in soil (TOCS) from an equation considering the bulk density, porosity and surface area. The highest content of TOCS is presented in the soils of sites reforested with *Abies religiosa*, *Pinus* spp. and *Pinus-Cupressus*. The agricultural soils contain less than a half of COS in relation the forest soils. Higher levels of TOCS content are located in the Las Cruces and Guadalupe

* Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, 04960, Coyoacán, México, D.F. E-mail: gvela@correo.xoc.uam.mx

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, 04510, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, D. F. E-mail: jlopezblanco@hotmail.com

*** Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, 04520, Coyoacán, México, D. F. E-mail: lulugamino@hotmail.com

Ranges, as well as the volcanic soils of the Pelado, Tláloc and Cuautzin volcanoes. Local administrative units whose soils have the highest concentration of TOCS are Cuajimalpa and Magdalena Contreras. It is necessary to assess, from an economic-environmental approach the ecosystem services provided by the SC, in this case as a soil carbon storage, so that economic incentives are attractive to the local land-owners.

Key words: Climate change, total organic carbon, Suelo de Conservación, soil carbon, Distrito Federal.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático a nivel global es uno de los principales problemas ambientales que enfrenta el género humano. Una manifestación de dicho cambio es el incremento en la temperatura del planeta de cerca de medio grado centígrado desde el siglo pasado (Ciesla, 1996). Cabe mencionar que la atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno y contiene pequeñas cantidades de hidrógeno, helio, argón, neón y otros gases. Algunos de estos últimos, tales como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), y el óxido de nitrógeno (N_2O), son considerados como los principales gases de efecto invernadero (GEI), (Colqué y Sánchez, 2007).

Durante los últimos 20 años la incorporación de CO_2 a la atmósfera se ha debido en 75% a la quema de combustibles fósiles y el resto, **dominantemente**, a cambios de uso de suelo, en particular a la deforestación (IPCC, 2001). Como consecuencia del incremento de la concentración atmosférica de CO_2 y otros gases de efecto invernadero, se espera que la temperatura media superficial a nivel global aumente entre 1.4 y 5.8° C de 1990 al 2100 (Estrada, 2007).

Al bióxido de carbono (CO_2) se le considera como el principal gas responsable del efecto invernadero, y que a su vez ha provocado un incremento en la temperatura (Smith y Smith, 2005). Sin embargo, los gases de efecto invernadero podrían reducirse mediante dos procesos: *a*) la reducción de emisiones antropogénicas de CO_2 , y *b*) creando o mejorando los sumideros de carbono en la biósfera. Sobre este último punto, el manejo forestal y la conservación de los bosques pueden contribuir a

la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, secuestro, almacenamiento y concentración del carbono atmosférico. De igual manera, los sistemas agroforestales podrían remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera (Andrade y Muhammand, 2003).

Lo anterior resalta la importancia de los ecosistemas forestales, ya que éstos contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro tipo de uso del suelo, y sus suelos contienen cerca del 40% del total del carbono, por lo que son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los bosques. Por lo general, en los bosques naturales el carbono del suelo está en equilibrio, pero tan pronto como ocurre la deforestación o la reforestación, ese equilibrio es afectado. Actualmente se estima que cada año son deforestadas entre 15 y 17 millones de hectáreas, sobre todo en los trópicos (FAO, 2002), y que muy a menudo parte del carbono orgánico se pierde dando lugar a una considerable emisión de CO_2 . Por lo tanto, donde la deforestación no puede ser detenida, es necesario un manejo correcto para minimizar las pérdidas de carbono. La reforestación, sobre todo en los suelos degradados, con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de almacenar carbono a largo plazo, tanto en la biomasa, como en el suelo.

Los suelos contienen más carbono que la vegetación y la atmósfera (Martínez *et al.*, 2008). Los servicios ecosistémicos que puede proveer el suelo son poco valorados en las áreas urbanas como la Ciudad de México, ya que prácticamente se concibe al suelo como soporte de construcciones o infraestructura, lo que favorece prácticas para su aislamiento o “sellamiento”, dando origen a problemas de encharcamientos, inundaciones, etc. (Cram *et al.*, 2008).

Uno de los servicios ecosistémicos que proporciona el Suelo de Conservación del Distrito Federal es precisamente ser un almacén de carbono. A este respecto, es conveniente mencionar que en el Distrito Federal se producen 36.2 millones de toneladas de CO_2 , equivalentes al 61% de las emisiones que se generan en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), (SMA, 2007).

La capacidad para llevarlo a cabo varía de acuerdo con el tipo de suelo y sus características, historial de manejo y factores ambientales (Vergara *et al.*, 2004). La transferencia de carbono estabilizado de la vegetación al suelo es un proceso importante para abatir las concentraciones elevadas de CO₂ atmosférico (FAO, 2001).

Sin embargo, el Suelo de Conservación ha estado permanentemente amenazado por el crecimiento de la ciudad. La presencia de asentamientos humanos irregulares, así como el desarrollo inmobiliario, han contribuido a que la urbanización se desplace hacia las áreas rurales, que en los últimos 60 años ha avanzado a razón de cerca de una hectárea por día, lo que impacta en que alrededor del 30% del SC tiene cierto grado de invasión (Castillo, 2009). Esto ha causado, entre otros, los siguientes problemas: sobreexplotación de los mantos acuíferos, daños a la cubierta vegetal, contaminación del suelo, deforestación y erosión, pérdida de la vegetación nativa y de biodiversidad, y disminución de especies de flora y fauna silvestre (CORENADER, 2002).

El objetivo de este trabajo es estimar el almacenamiento de carbono orgánico total en suelos (COS) con vegetación original de bosque, en áreas reforestadas y con uso agrícola en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

ÁREA EN ESTUDIO

El Suelo de Conservación

El Distrito Federal se localiza en el suroeste de la Cuenca de México y cuenta con una superficie de 148 179 ha, que administrativamente se divide en suelo urbano (SU) con una extensión de 60 868 ha (41%), y Suelo de Conservación (SC) con 87 294 ha (59%), (Figura 1), el cual está conformado con porciones de nueve de las delegaciones políticas del Distrito Federal: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac y Xochimilco. Por su riqueza natural y por la importancia de los servicios ecosistémicos que presta a los habitantes del área urbana, es de fundamental importancia su atención, cuidado y conservación ambiental (SMA, 2007).

El Suelo de Conservación constituye el patrimonio natural, del cual depende el bienestar de las generaciones futuras del Distrito Federal, ya que esta área proporciona bienes y servicios ecosistémicos que permiten la viabilidad de la ciudad, entre los que se encuentran: la captación e infiltración de agua a los mantos acuíferos, la regulación del clima, el mejoramiento de la calidad del aire, hábitat para la biodiversidad, oportunidades para la educación, investigación y recreación, producción de alimentos y materias primas, entre otros (SMA, 2004).

Características biofísicas del Suelo de Conservación

El relieve del Distrito Federal está compuesto por una llanura lacustre y sierras de origen volcánico, entre las que destacan las de Las Cruces, Chichinautzin, Cerro de la Estrella, Ajusco, Santa Catarina y Guadalupe (DDF, 1997). Cuenta con bosques de oyamel, pino y encino, que interactúan con arbustos, herbáceas, cactáceas y pastizales. En las planicies se encuentran coberturas de vegetación propia de los márgenes de los lagos, y en lo que queda de ellos, distintas plantas acuáticas. Esta riqueza de hábitat permite la existencia de una gran diversidad faunística.

Su clima es semifrío en las partes altas y templado húmedo en las partes medias y bajas. La temperatura media anual es de 16° C, con extremos de 36 y 7° C. El mes más frío es enero, y mayo el más cálido. La precipitación media anual es de 948.7 mm (CORENADER, 2002).

El funcionamiento natural de los ecosistemas del Suelo de Conservación, además de fortalecer su capacidad como sumidero de carbono, es fundamental para el mantenimiento del ciclo hidrológico de la Cuenca de México, ya que abarca las áreas más importantes para la recarga del acuífero. Se estima que el Suelo de Conservación provee entre el 60 y el 70% del agua que consume la Ciudad de México. Además, proporciona refugio a más de 2 500 especies de flora y fauna, integradas en una extensa diversidad de ecosistemas y hábitat únicos, debido a que está incluido dentro del Eje Neovolcánico, que es el hábitat del 2% de la biodiversidad mundial, y del 12% de especies de flora y fauna de México (SMA, 2007).

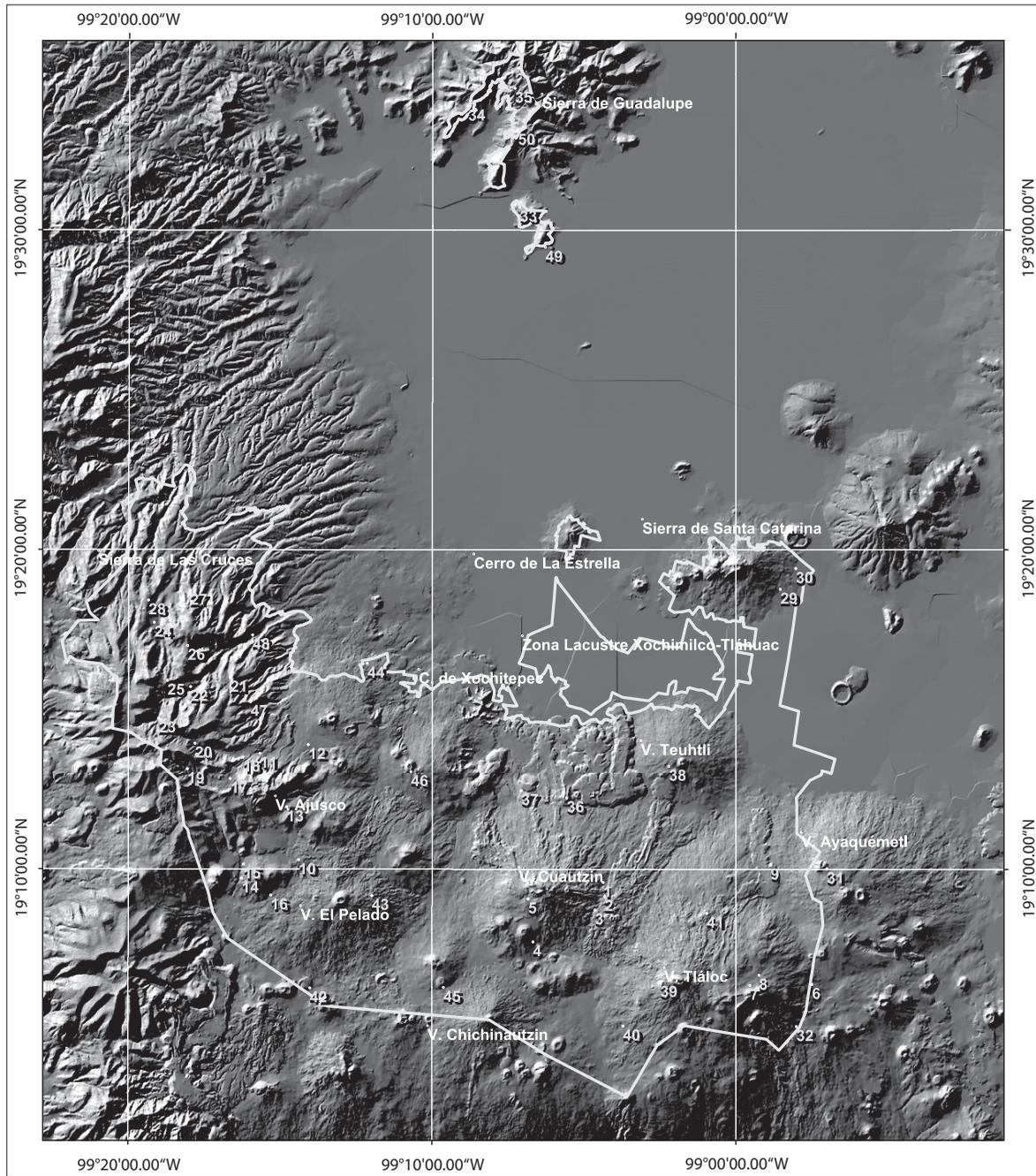


Figura 1. Localización del Suelo de Conservación del Distrito Federal y los 50 sitios de muestreo de suelos.

MÉTODOS

Análisis de información documental y cartográfica

Se analizó la información documental existente, así como de las cartas topográficas y temáticas en escala 1:50 000 y se obtuvieron fotografías aéreas a escala 1:75 000 de un vuelo realizado por el INEGI (1994), donde se delimitaron por medio de fotointerpretación, las unidades geomorfológicas morfogenéticas de acuerdo con el sistema del levantamiento geomorfológico del *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences* (ITC), (Verstappen y Van Zuidam, 1991). Posteriormente se definieron los sitios de muestreo de suelos, considerando como criterio principal que cada sitio fuese representativo en relación con la variabilidad espacial en el relieve y apoyándose para ello con diversos recorridos en el área para su verificación y validación.

Las fotografías aéreas fueron georreferidas y se les aplicó una corrección fotogramétrica, posteriormente se digitalizaron las unidades geomorfológicas con apoyo de un sistema de información geográfica, utilizando el SIG ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*).

Posteriormente, a partir de la integración de la información antecedente, se elaboró la cartografía base del Suelo de Conservación. En total se consideraron 50 sitios de muestreo (Figura 1) y en cada uno de ellos se tomaron muestras de suelo y se obtuvieron las características morfológicas y morfodinámicas del relieve del sitio, asimismo, las características de vegetación y uso del suelo. El historial de reforestación de los sitios seleccionados se consideró de acuerdo con la información proporcionada por la Comisión de Recursos Naturales (CORENA).

Trabajo en campo y laboratorio

En cada sitio seleccionado se tomaron muestras simples del suelo con una barrena tipo “holandés” a una profundidad de 0-30 cm, considerando un total de 50 muestras representativas de la zona en estudio. Cabe mencionar que no se consideró el mantillo debido a que los restos poco descompuestos de vegetales y animales que se encuentran en

él, no están asociados a los componentes minerales del suelo, independientemente de las prácticas de laboreo y/o de manejo forestal a que está sujeto. Se caracterizó la cobertura vegetal, los procesos geomorfológicos dominantes y el uso del suelo. Con apoyo de un localizador GPS se georreferió cada sitio y posteriormente la información se integró a un sistema de información geográfica (SIG).

En laboratorio y con el fin de homogenizar las muestras de suelos, una vez secas, fueron molidas en un mortero de porcelana y luego se pasaron por un tamiz con malla del número 20; posteriormente se guardaron en envases de plástico, para su procesamiento físico-químico.

La densidad aparente (D_a) se estimó en muestras no alteradas de suelo utilizando cilindros de 7 cm de diámetro y 6 cm de altura, mediante el método del cilindro propuesto por Blake y Hartge (1986). El contenido de carbono orgánico total (COS) del suelo se estimó a partir de la materia orgánica del suelo (MO), misma que se evaluó por el método propuesto por Walkley y Black (1947). Este método 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. pH 7). Este procedimiento detecta entre un 70 y 84% del carbón orgánico total, por lo cual es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar entre suelo y suelo. En los suelos de México se utiliza el factor 1.2987 (1/0.77), (SEMARNAT, 2002). Posteriormente, la estimación del carbono orgánico total se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$\% C = \% MO / 1.724 \text{ o } \% C = \% MO (0.58),$$

donde: CO = Carbono orgánico total (%), MO = Materia orgánica (%).

Se empleó el factor de Van Benmelen de 1.724 que resulta de la suposición de que la materia orgánica del suelo contiene un 58% de Carbono (1/0.58 = 1.724), (*Ibid.*). A continuación, el conte-

nido de carbono orgánico total en suelos se calculó con base en la ecuación propuesta por González *et al.* (2008):

$$\text{COS} = \text{CO} (\text{Da}) \text{ Os},$$

donde: COS=Carbono orgánico total en suelo por superficie (Mg ha^{-1}); CO= Carbono orgánico total (%); Da= Densidad aparente (Mg m^{-3}); Ps= Profundidad del suelo (m)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Niveles de COS en el Suelo de Conservación del Distrito Federal

Se obtuvo un mapa que representa las áreas con diferentes concentraciones de COS en los suelos del SC del Distrito Federal (Figura 2), considerando cuatro intervalos de niveles de almacenamiento de carbono orgánico; las categorías fueron: Muy Alto ($>150 \text{ Mg ha}^{-1}$), Alto ($100\text{-}150 \text{ Mg ha}^{-1}$), Medio ($50\text{-}100 \text{ Mg ha}^{-1}$) y Bajo ($<50 \text{ Mg ha}^{-1}$), (Vela *et al.*, 2009).

La delimitación de las áreas se hizo considerando las características particulares del relieve (origen, tipo, litología, edad y geometría) asumiendo que, por su homogeneidad en esos aspectos, las concentraciones de carbono orgánico también permanecerían en sentido relativo. Se realizó una revisión específica en la literatura, acerca del reporte de valores de concentración de carbono orgánico en el suelo, con el fin de tener una referencia general de lo que se considera como valores altos y bajos de ello. No existe una referencia en donde se establezca dicha jerarquización de manera general, entonces, para fines de este trabajo, se consideraron los límites de los intervalos, en función de los valores máximos y mínimos de concentración de carbono obtenidos de los análisis de suelo.

Áreas con contenido muy alto de COS ($>150 \text{ Mg ha}^{-1}$)

Las áreas con contenidos muy altos de COS se encuentran en las laderas de montaña de las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa, particularmente en las cuencas

hidrográficas de los ríos Eslava y Magdalena y particularmente en el área de los Dinamos. Las otras áreas que corresponden con el intervalo de contenidos muy altos son los volcanes Pelado y Cuautzin, en donde los intervalos altitudinales van de los 3 000 hasta los 3 550 msnm y la vegetación se caracteriza por ser de bosques de *Pinus hartwegii*, *P. montezumae*, *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*. Estas áreas cubren una superficie de 12 739 ha (14%), (Figura 2). Dichas áreas, de manera general, se caracterizan por ser de origen Pleisto-holocénicas y de composición andesítico-basálticas y los suelos más representativos corresponden a los Andosoles, Phaeozem y Regosoles (Rodríguez y López, 2006).

Áreas con contenido alto de COS ($100\text{-}150 \text{ Mg ha}^{-1}$)

Las áreas más extensas con valores altos de COS abarcan una superficie de 37 193 ha (42%), se caracterizan por ser espacios amplios que se concentran en las porciones de los suelos de las laderas de montaña superiores, medias e inferiores de la Sierra de Las Cruces, los volcanes Tláloc, Pelado, Cuautzin, Tulmiac, Chichinautzin y Ajusco. En forma general estas áreas se caracterizan por ser de origen pleisto-holocénicas y de composición andesítico-basáltico-dacítico, pero a diferencia de las áreas con niveles muy altos en COS, aquí se presentan en laderas de montaña formadas por flujos lávicos andesítico-basálticos y se encuentran a una altitud que va de 2 279 a los 3 000 msnm, por lo que se encuentran en bosques de *Pinus montezumae*, *P. hartwegii*, *Abies religiosa* y *Alnus jorullensis*. También son frecuentes los afloramientos rocosos, en los cuales se puede encontrar *Juniperus* spp, y un incipiente bosque de *Pinus montezumae*, los cuales han crecido en las oquedades en donde se acumula el suelo. Los suelos más representativos corresponden a Andosoles, Phaeozems, Regosoles y Leptosoles.

Otras áreas que presentan valores altos de COS en el suelo es en la Zona Lacustre de Xochimilco y Tláhuac, en donde geológica y geomorfológicamente los materiales que las forman están integrados por elementos que han sido transportados desde las partes altas por procesos aluviales y gravitacionales hacia las más bajas de la Cuenca

de México, formando depósitos lacustres. Las unidades de suelos que predominan son: Phaeozem, Solonchak y Gleysoles. En su mayoría corresponden a áreas planas (<5% de inclinación) que se usan para la producción agrícola, principalmente de maíz, hortalizas y flores.

También al norte de la Ciudad de México, en la Sierra de Guadalupe, se reportan valores altos de COS, los cuales corresponden con áreas de vegetación de *Quercus* spp. (Figura 2). Esta sierra es una formación volcánica con flujos lávicos y piroclásticos, así como depósitos laháricos en sus flancos, en donde predominan las rocas dacíticas y riolíticas del Mioceno medio (García *et al.*, 2006) y de manera secundaria las andesitas, donde las unidades de suelos predominantes son Phaeozem y Leptosoles.

Áreas con contenido medio de COS (50-100 Mg ha⁻¹)

Las áreas que presentan valores medios de COS en el SC del Distrito Federal tienen una superficie de 31 838 ha (36%) y se concentran principalmente en los piedemontes inferiores y laderas inferiores de la Sierra Chichinautzin, de la Sierra de Guadalupe, Sierra de Santa Catarina y en el cerro de La Estrella (Figura 2). Los piedemontes y laderas inferiores generalmente corresponden con un intervalo altitudinal que va de los 2 250 a los 2 800 msnm, en donde las pendientes van del 5 al 15%. La cobertura vegetal es muy diversa ya que se encuentran desde bosques de pinos, entre los que destacan las especies de *Pinus montezumae*, *P. patula*, *P. ayacahuite*, en la Sierra Chichinautzin, así como bosques de *Quercus* spp., y de *Pinus* spp., en el Ajusco o de matorral compuesto por *Senecio praecox*, *Yucca* spp., y diversas especies de *Opuntia* spp., en la Sierra de Santa Catarina y Sierra de Guadalupe; en esta última, además, existen amplias áreas con vegetación inducida a partir de reforestaciones con *Eucalyptus* spp. Las unidades de suelo más representativas corresponden con Regosol éutrico, Leptosol lítico y Phaeozem háplico.

Áreas con contenidos bajos de COS (<50 Mg ha⁻¹)

Dentro del Suelo de Conservación existen pocas áreas que presenten valores bajos de COS, las cuales

cubren una superficie de 6 761 ha (8%), siendo las unidades de suelos más representativas los Phaeozem háplicos y Leptosoles, que se encuentran en las planicies aluviales intermontanas de los volcanes Tulmiac y Cuautzin, asimismo en el piedemonte inferior de las estructuras volcánicas de Milpa Alta. Se ha demostrado que en las planicies aluviales se presentan valores bajos de COS por la actividad agrícola dedicada a la producción de maíz, avena forrajera, zanahoria, haba, papa y chícharo que se ha dado por muchos siglos y que genera la liberación de carbono por el propio laboreo (Figura 2).

Capacidad del Suelo de Conservación para almacenar y retener COS

Es muy alto el potencial que presenta el Suelo de Conservación para ser considerado como un reservorio de carbono natural, sin cuantificar aun el carbono que puede retener la vegetación en su parte aérea, lo que resulta fundamental para mitigar, en parte, el efecto del cambio climático en el Distrito Federal. Cabe mencionar que en este trabajo sólo se hace referencia al carbono que se encuentra en los suelos, a una profundidad de 0 a 30 cm, que se considera es la parte del suelo más sensible por los cambios de uso de suelo y de manejo antrópico. También es importante recalcar que estos datos deben considerarse como una aproximación sobre el COS del suelo debido a la complejidad de la cubierta vegetal y la heterogeneidad del sistema edáfico. Asimismo, los resultados de este trabajo muestran que el 56% de los suelos del SC tienen una capacidad entre muy alta y alta para almacenar y retener carbono y si sumamos las áreas con una capacidad media se tiene que casi el 92% del SC cubre satisfactoriamente esta función. Por lo que es de vital importancia que la superficie del SC sea considerada como almacén principal de carbono en el Distrito Federal, por la cantidad de COS que tiene estabilizado ahora y que aún puede almacenar en cantidades importantes en el futuro cercano.

Carbono orgánico total en los suelos por tipo de vegetación

Debido a la heterogeneidad de clases de cobertura vegetal y uso del suelo que presenta el Suelo de Conservación, fue importante evaluar los resul-

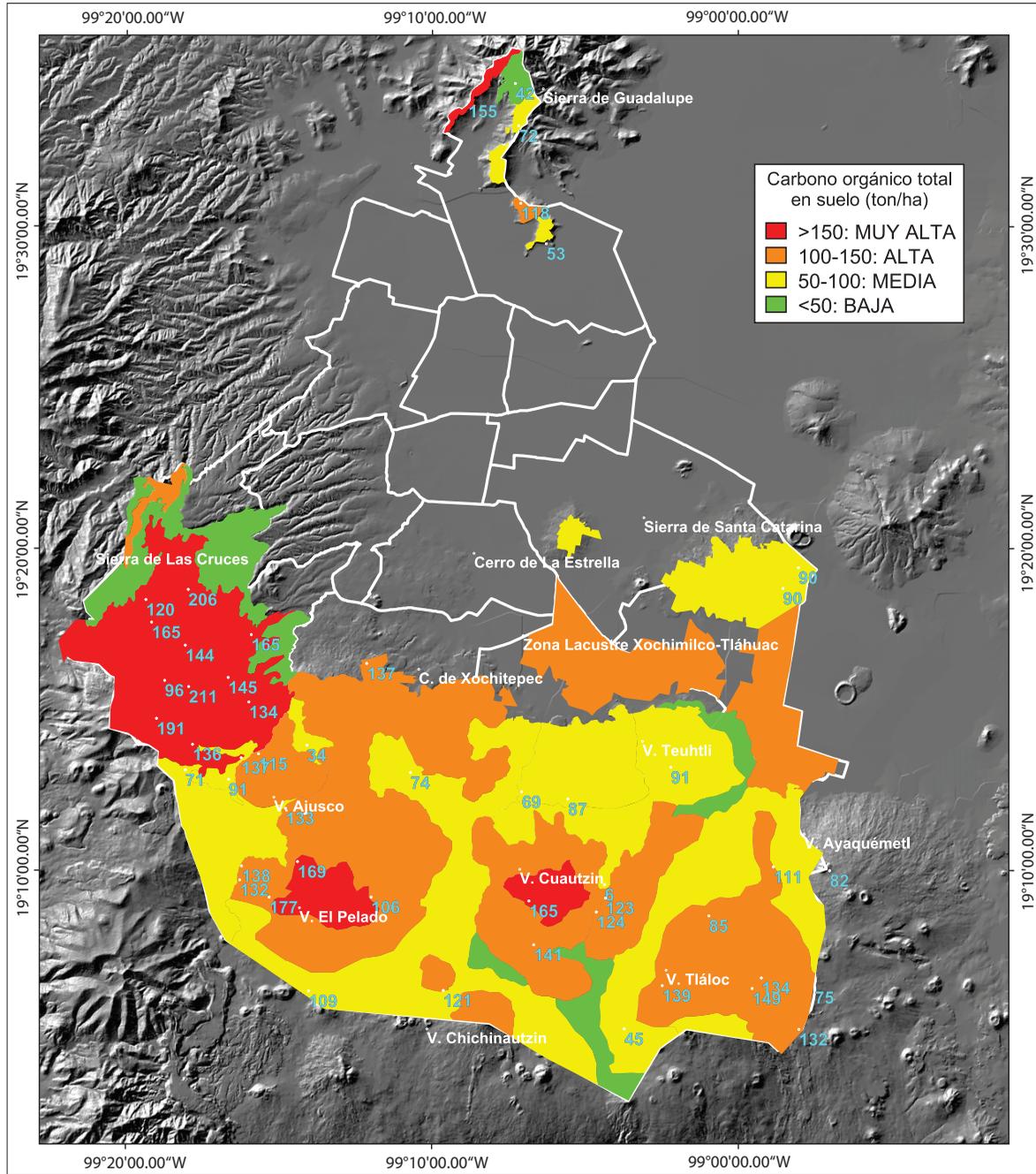


Figura 2. Niveles de concentración de carbono orgánico total en suelos por ha (COS) en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

tados de valores de Carbono Orgánico Total en Suelos (COS) considerando esa diversidad que existe en el área en estudio. Cabe señalar que por la diversidad del uso de suelo, cobertura vegetal, complejidad en el relieve, suelos y condiciones de clima, los valores que se presentan son estimativos, basándose principalmente en las condiciones de homogeneidad del relieve/suelo para su representación espacial. Es decir, es una generalización de la distribución espacial de los valores, en función de esas variables para cada sitio.

Carbono orgánico total en suelos de áreas con bosque original

Las áreas arboladas de vegetación nativa del Suelo de Conservación se caracterizan por la presencia de bosques de *Abies religiosa* (oyamel), *Pinus* spp. (pinos) y *Quercus* spp. (encinos). El bosque de *Abies religiosa* presentó el nivel más alto de COS con 145.6 Mg ha⁻¹, el bosque de *Quercus* spp., con 121.3 Mg ha⁻¹ y el bosque de *Pinus* spp., con 119.4 Mg ha⁻¹ (Tabla 1). Estos valores altos se deben a que son bosques que se encuentran bien conservados y donde las hojas de las especies latifoliadas y las acículas de los *Pinus* spp., han aportado cantidades importantes de materia orgánica a los suelos en estos sitios. Además de que la tendencia de acumulación de COS está influenciada por la edad de los árboles (Salomón *et al.*, 2007).

Tabla 1. Contenido de carbón orgánico total en suelos (COS) por tipo de vegetación/uso

Tipo de vegetación/ uso	COS (Mg ha ⁻¹)	Desv. estándar	Núm. de sitios
Bosque de <i>Abies religiosa</i>	145.6	28.5	9
Bosque de <i>Quercus</i> spp.	121.3	51.1	7
Bosque de <i>Pinus</i> spp.	119.4	37.3	24
Matorral	111.7	49.1	4
Pastizal	90.0	0.1	2
Agrícola	46.1	35.6	4

Carbono orgánico total en suelos de áreas con reforestación

Las especies más utilizadas para reforestación en el área en estudio son *Abies religiosa*, *Pinus* spp., *Cupressus lussitanica*, *Quercus* spp. y en la Sierra de Guadalupe y Santa Catarina, en donde existe vegetación de matorral, se utilizan la *Dodonaea viscosa*, *Quercus* spp., *Nolina parviflora*, *Eucalyptus* spp., *Casuarina equisetifolia* y *Acacia farnesiana*, entre otras, mientras que en el área de Xochimilco se emplean especies como *Quercus* spp., *Cupressus lussitanica*, *Pinus* spp., *Salix bonplandiana* y árboles frutales como *Prunus persica*, *Prunus doméstica*, *Pyrus communis* esto es, durazno, ciruelo y pera, respectivamente (Orozco, 2004).

Los sitios con mayor cantidad de COS se presentan donde se han llevado a cabo reforestaciones con la especie *Abies religiosa* y *Pinus* spp., con 155.2 Mg ha⁻¹. Otro sitio es en donde se ha reforestado con *Eucalyptus camandulensis*, el cual se encuentra en la Sierra de Guadalupe, en donde el valor obtenido es de 153.4 Mg ha⁻¹.

Los valores más bajos de COS se localizaron en los sitios donde se ha reforestado con *Cupressus lussitanica* estimándose en 56.6 Mg ha⁻¹. También en suelos de áreas en donde existen especies de *Pinus* y *Cupressus*, en las que el valor de COS es de 85.9 Mg ha⁻¹.

Carbono orgánico total en suelos de áreas con matorral

Este tipo de vegetación se encuentra principalmente en la Sierra de Santa Catarina y en la de Guadalupe, que por sus características de clima más seco, permite el crecimiento de especies arbustivas como *Opuntia* spp., *Senecio praecox*, *Calliandra grandifolia*, *Prunus serotina*, *Ensenhartia polystachya*, *Nolina parviflora*, *Acacia farnesiana*, *Prosopis glandulosa*, entre otras. Para este tipo de vegetación se obtuvo un valor de COS de 111.7 Mg ha⁻¹ (Tabla 1), lo que se atribuye a que el estrato herbáceo es abundante, y es favorecido por un mayor acceso a la luz.

Carbono orgánico total en suelos de áreas agrícolas

La agricultura que se realiza en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, es predominantemente

de temporal con cultivos anuales como el maíz, la avena forrajera y el nopal. En general para los sitios con actividad agrícola el promedio resultó ser de 46.1 Mg ha⁻¹ (Tabla 1). Particularmente para los contenidos de carbono orgánico en suelos cultivados con maíz es de 32.9 Mg ha⁻¹ y para la avena forrajera de 42.6 Mg ha⁻¹. Como se observa, ese fue el valor más bajo de los evaluados en este rubro, esto se debe a que existe una falta de cobertura vegetal del suelo, debido a que las labores culturales realizadas durante el proceso de siembra y cosecha lo dejan desprotegido durante una parte importante del año. Particularmente para el maíz, esta situación es más drástica con respecto al COS, ya que es un cultivo en donde se realiza una mayor cantidad de prácticas de preparación de terrenos y al sembrarse en surcos existe un mayor aporte de gases de efecto invernadero que son liberados por estas labores, ya que la mayor oxidación se debe al incremento de aireación del suelo y el mayor contacto de los residuos. Asimismo, en estas áreas existe un mayor impacto de los procesos erosivos, ya que la erosión aumenta al quedar la superficie de los suelos descubierta y expuesta a la acción del agua y viento. Cabe mencionar que el carbono de las plantas entra al *pool* de carbono orgánico del suelo (COS) en forma de una capa de residuos orgánicos (mantillo), compuesta de hojas y ramas, asimismo, de raíces, exudado de raíces o excretas de animales. El incremento del COS dependerá de la cantidad y calidad de los residuos, pero también de las condiciones climáticas.

Tabla 2. Contenido de carbón orgánico total en suelos (COS) por delegación

Delegación	COS (Mg ha ⁻¹)	Desv. estándar	Núm. de sitios
Cuajimalpa	164.0	43.1	3
Magdalena Contreras	143.0	40.8	10
Tlalpan	118.3	38.0	13
Milpa Alta	106.9	42.8	15
Tláhuac	90.0	0.1	2
G.A. Madero	87.9	47.4	5
Xochimilco	77.8	12.6	2

Carbono orgánico total en suelos de áreas con pastizales

En el área en estudio los pastizales se encuentran en asociación principalmente con el bosque de pino, en donde predominan principalmente las especies de *Festuca toluensis* y *Muhlenbergia macroura*, que son pastos amacollados, y que en dicha área forman una cobertura permanente en el suelo, que contribuyen en gran medida a la formación de materia orgánica y por lo tanto a la acumulación de carbono orgánico en el suelo, donde se estima en promedio 90 Mg ha⁻¹, cifra que es casi el doble de la de los suelos con actividad agrícola (Tabla 1).

Carbono orgánico total en suelos por delegación, en sitios reforestados

Al considerar los grupos de sitios de muestreo de suelo por delegación política, que conforman el SC del Distrito Federal, la delegación Cuajimalpa es la que presenta una mayor concentración de COS (Tabla 2), con un promedio de 164.0 Mg ha⁻¹. Esto se debe a la mayor cobertura vegetal de bosques de *Abies religiosa* y a la mayor presencia de humedad en el suelo. Las delegaciones de Magdalena Contreras, Tlalpan, Milpa Alta y Tláhuac, oscilan entre los 143.0 a 90.0 Mg ha⁻¹ de COS. Los valores más bajos se presentaron en las delegaciones Gustavo A. Madero (87.9 Mg ha⁻¹) y Xochimilco (77.8 Mg ha⁻¹), en donde predomina la vegetación de matorral.

También se evaluó la concentración de COS de las áreas reforestadas con respecto a la vegetación original en cada sitio de muestreo de suelo, y se determinó que el COS es menor en las áreas reforestadas, comparado con las áreas en donde se encuentra vegetación nativa, que actualmente se considera ya “madura” o que corresponde a bosques bien desarrollados. Así se tiene que en la delegación Cuajimalpa el COS en los bosques de oyamel es de 164.0 Mg ha⁻¹, mientras que en promedio, en las áreas de bosque que han sido reforestadas con pino principalmente, es de 149.3 Mg ha⁻¹. Lo mismo se presenta en las delegaciones Tlalpan y Milpa Alta, en donde el COS en las áreas con vegetación de bosque bien establecido es de 118.3 y de 106.9 Mg ha⁻¹, respectivamente, y en las reforestadas disminuye de manera ligera ya que en la delegación Tlalpan es de 109 Mg ha⁻¹ y en Milpa Alta a

86.6 Mg ha⁻¹. Un caso interesante se presenta en la Sierra de Guadalupe, en la delegación Gustavo A. Madero, en donde el COS medido en el área de bosque con *Pinus* y *Quercus* es de 104.8 Mg ha⁻¹, mientras que en las reforestadas con *Eucalyptus* spp., fue de 62.5 Mg ha⁻¹.

Carbono orgánico total en suelos por unidades geomorfológicas

Los resultados mostraron, al considerar los grupos de sitios de muestreo de suelo por unidad geomorfológica morfogenética que conforman el SC del Distrito Federal, que las unidades de laderas de montaña superiores, medias e inferiores de flujos lávicos, principalmente de andesitas y basaltos pleistoholocénicos y cubiertos de depósitos piroclásticos, presentan el mayor valor de COS con 122.4 Mg ha⁻¹ (Tabla 3). Los sitios en piedemontes aluviales acumulativos locales intermontanos del holoceno tuvieron 116.4 Mg ha⁻¹, las laderas de montañas externas e internas de cono de escoria de andesitas y basaltos pleistoholocénicos tuvieron en promedio 106.5 Mg ha⁻¹, y finalmente, las planicies aluviales acumulativas locales intermontanas del holoceno, tuvieron un valor de COS de 57.8 Mg ha⁻¹.

Tabla 3. Contenido de carbón orgánico total en suelos (COS) por tipo de unidad geomorfológica morfogenética

Unidades Geomorfológico Morfogenéticas	COS (Mg ha ⁻¹)	Desv. estándar	Núm. de sitios
Laderas de montaña de flujos lávicos	122.4	43.9	31
Piedemonte local intermontano	116.4	46.8	12
Laderas de montañas externas e internas de cono de escoria	106.5	26.7	5
Planicie aluvial local intermontana	57.8	34.0	2

CONCLUSIONES

En el Suelo de Conservación del Distrito Federal los mayores contenidos de carbono orgánico total en suelos (100-150 Mg ha⁻¹) se presentan en los

sitios con vegetación de *Abies religiosa* reforestados con *Pinus* spp.

La vegetación que más contribuye a la captura de COS son los bosques de *Abies religiosa*, seguida de las reforestaciones en donde se han utilizado especies de dos géneros, *Pinus* y *Cupressus*, o aquellas plantaciones en donde sólo se ha reforestado con *Pinus* spp.

Los terrenos en donde se llevan a cabo actividades agrícolas, tienen una capacidad de retener COS menor a la mitad (<50 Mg ha⁻¹) que lo registrado en áreas con vegetación de bosque. Los cultivos que se siembran en surcos como el maíz, generalmente retienen menos de la mitad de COS, en comparación con los cultivos de cobertera, como la avena forrajera. Por último, se considera que las delegaciones con mayor concentración de COS en el suelo son Cuajimalpa y Magdalena Contreras.

Es importante recalcar la capacidad que tiene el Suelo de Conservación del Distrito Federal para ser considerado como un espacio trascendental en cuanto a funcionar como almacén de carbono, pero no servirá de mucho seguir manejando ese estatus de conservación, si no se controla y restringe la deforestación en el Distrito Federal. Así como frenar el cambio de uso del suelo, principalmente de áreas con bosque, uso agrícola o pecuario, a uso urbano.

Es necesario evaluar, desde una perspectiva económico ambiental, los bienes y servicios ecosistémicos que ofrece el SC del Distrito Federal, principalmente el almacenamiento de carbono, no sólo en la vegetación, sino también el que se encuentra de manera estable en los suelos (COS), a fin de que los estímulos económicos que se generen por ese almacenamiento sean atractivos para los poseedores de los terrenos y garantizar de esta manera la permanencia y manutención de los ecosistemas naturales en donde aún se localiza vegetación nativa.

También es recomendable sensibilizar a la población de lo que se pierde en cuanto a calidad y salud del ambiente con dichos procesos de cambio de uso del suelo, ya que la sustentabilidad de la Ciudad de México depende de las acciones que se realicen en el Suelo de Conservación del Distrito Federal.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) y al Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México (CVCCCM), el apoyo otorgado para la realización de este trabajo. Así como a Valeria Bello Téllez, Juan Carlos Cruz Chona y Armando Navarrete Segueda la ayuda brindada durante el trabajo en campo y laboratorio.

REFERENCIAS

- Andrade, J. H. e I. Muhammand (2003), ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?, *Agrofostería en las Américas*, vol. 10, no. 39-40, pp. 109-116.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge (1986), "Bulk density", in Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis*, Agronomy 9, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 363-365.
- Castillo, M. (2009), "Invadido el 30% del Suelo de Conservación en el DF", *Milenio* [<http://www.milenio.com/node/311675>. 29/10/09)].
- Ciesla, W. M. (1996), *Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto*, FAO, Roma.
- Colqué, M. T. y V. E. Sánchez (2007), *Los gases de efecto invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?*, Asociación Civil Labor / Amigos de la Tierra, Perú [<http://www.foei.org/esp/climate/index.htm>], consultado 12 de junio, 2011].
- CORENADER (2002), "Programa de Reforestación", Secretaría del Medio Ambiente, Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Cram, S., H. Cotler, L. M. Morales, I. Sommer y E. Carmona (2008), "Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 66, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 81-104.
- DDF (1997), "Programa Metropolitano de Recursos Naturales", Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México.
- Estrada, H. I. (2007), *Carbono en biomasa aérea en suelo y su relación con la fracción fina de este reservorio*, Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo, de México, pp. 1-24.
- FAO (2001), *Situación de los bosques del mundo*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Depósitos de documentos de la FAO [http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=docrep/htm].
- FAO (2002), *Captura de carbono en los suelos, para un mejor manejo de la tierra*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia.
- García Palomo, A., V. Carlos Valerio, C. López Miguel, A. Galván García, A. Concha Dimas (2006), "Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, núm. especial de *Geología Urbana*, tomo LVIII, núm. 2, pp. 195-204.
- González, M. L., B. J. D. Etchevers y M. C. Hidalgo (2008), "Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo", *Agrociencia*, núm. 42, pp. 741-751.
- INEGI (1994), *Fotografías aéreas de Milpa Alta a escala 1:75 000*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- IPCC (2001), "Third assessment report-climate change, 2001. The scientific basis: summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP-WMO, p. 7 [www.ipcc.ch]; consultado 21 de agosto de 2010].
- Martínez, H. E., J. P. Fuentes y H. E. Acevedo (2008), "Carbono orgánico y propiedades del suelo", *Suelo y Nutrición Vegetal*, vol. 8, núm. 1, pp. 68-96.
- Orozco, M. (2004), "Inicia 2a etapa de reforestación en Xochimilco", *El Universal Ciudad de México* [<http://www2.eluniversal.com.mx/pls/impreso/noticia.html>]. 21 de agosto de 2004; consultado 21 de agosto de 2010].
- Rodríguez Gamiño, M de L. y J. López Blanco (2006), "Caracterización de unidades biofísicas a partir de indicadores ambientales en Milpa Alta, Centro de México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 60, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 46-61.
- Salomón, L., G. Gómez y B. Etchevers (2007), "Acumulación de carbono orgánico en el suelo en reforestaciones de *Pinus michoacana*", *Agrociencia*, vol. 41, núm. 7, pp. 711-721.
- SMA (2004), *Estrategia local de acción climática de la Ciudad de México / Acciones locales, logros globales*, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno de la Ciudad de México.
- SMA (2007), "Agenda ambiental de la Ciudad de México", *Programa de Medio Ambiente 2007-2012*, Secretaría del Medio Ambiente, Gobierno del Distrito Federal, México.

- SEMARNAT (2002), *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000*, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, publicado el 31 de diciembre de 2002 en el *Diario Oficial de la Federación*, Segunda Sección, México.
- Smith, R. L. y T. M. Smith (2005), *Ecología*, Pearson Addison Wesley, Madrid, España.
- Vela Correa, G., J. López Blanco, M. de L. Rodríguez Gamiño y A. Chimal Hernández, (2009), "Vulnerabilidad del Suelo de Conservación del Distrito Federal ante el cambio climático y posibles medidas de adaptación", Informe Final, Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, Instituto de Ciencia y Tecnología del D. F., México.
- Vergara, S., B. Etchevers y H. Vargas (2004), "Variabilidad del carbono orgánico en suelos de ladera del sureste de México", *TERRA Latinoamericana*, vol. 22, núm. 3, pp. 359-367.
- Verstappen, H. Th., and R. A. van Zuidam (1991), *The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards*, ITC Publication, 10.
- Walkey, A. and I. A. Black (1947), "An examination of the deghareff method for determining soil organic and a proposed modification of chromic acid titration method", *Soil Science*, no. 37, pp. 29-38.