

CONTENIDOS DE CARBONO ORGÁNICO DE SUELOS SOMEROS EN PINARES Y ABETALES DE ÁREAS PROTEGIDAS DE MÉXICO

ORGANIC CARBON CONTENT OF SHALLOW SOILS IN PINE AND SPRUCE FORESTS LOCATED IN MEXICAN PROTECTED AREAS

Gerardo Cruz-Flores^{1*}, Jorge D. Etchevers-Barra²

¹Edafología y Fisiología de la Nutrición Vegetal. UMIEZ. FES Zaragoza, UNAM. Batalla 5 de mayo, esquina Fuerte de Loreto, Colonia Ejército de Oriente. 09230. Iztapalapa, D. F. (edaynueve@gmail.com) ²Suelos. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México.

RESUMEN

Los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS), biomasa microbiana (Cbm) y coeficientes metabólicos (qCO_2) son indicadores de sostenibilidad. En México se carece de información sobre contenidos óptimos de COS, Cbm y qCO_2 en bosques templados, aunque conocerlos es importante para diseñar estrategias de uso y manejo adecuado de suelos forestales, generalmente someros y vulnerables. Esta investigación se realizó en nueve áreas naturales protegidas de México con bosques templados sobre suelos desarrollados de material ígneo, sedimentario o complejos metamórficos. Entre 2004 y 2009 se seleccionaron 187 sitios con rodales maduros de especies de los géneros *Pinus* y *Abies* donde se recolectaron suelos superficiales para determinar si los contenidos de COS, Cbm, qCO_2 y carbono en mantillo o necromasa (Cnm) son afectados por el tipo de material parental del suelo o por la presencia de especies de *Pinus* o *Abies*, donde las mejor representadas fueron *Pinus montezumae*, *P. teocote*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. hartwegii*, *P. lawsoni*, *P. ayacahuite* var. *oaxacana*, *Abies religiosa* y *A. vejarii*. El contenido promedio de COS fue superior a 100 Mg C ha⁻¹ y el Cbm osciló entre 0.25 y 2.6 Mg C ha⁻¹. Después del suelo, el mantillo fue la segunda reserva de carbono (Cnm) con promedio de 45 Mg C ha⁻¹. Suelos forestales sobre rocas sedimentarias y metamórficas, tuvieron mayores contenidos de COS (menor proporción de Cbm, mayores tasas C:N y menor eficiencia microbiana) que los observados en suelos derivados de material piroclástico (menor tasa C:N y mayor eficiencia microbiana). Bajo especies del género *Pinus* hubo menos COS que bajo las del género *Abies* en cuyos bosques se presentan estratos herbáceos y arbustivos con mayor diversidad vegetal que contribuyen al aumento de COS.

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) contents, from microbial biomass (MBC), and metabolic coefficients (qCO_2) are indicators of sustainability. In México there is a lack of information about the optimal level of SOC, MBC and qCO_2 contents in temperate forests, although understanding these is important for the design of adequate use and management strategies in forest soils, which are generally shallow and vulnerable. This study was carried out in nine natural protected areas (NPAs) in México with temperate forests over soils developed from igneous, sedimentary or complex metamorphic material. Between 2004 and 2009, 187 sites were selected with mature stands of species from the *Pinus* and *Abies* genera, where superficial soils were collected to determine whether the SOC, MBC, qCO_2 and necromass carbon (NMC) contents are affected by the type of parent material in the soil or because of the presence of *Pinus* or *Abies* species, where those best represented were *Pinus montezumae*, *P. tecocote*, *P. patula*, *P. pseudostrobus*, *P. hartwegii*, *P. lawsoni*, *P. ayacahuite* var. *oaxacana*, *Abies religiosa* and *A. vejarii*. The average SOC content was higher than 100 Mg C ha⁻¹ and the MBC ranged from 0.25 to 2.6 Mg C ha⁻¹. After the soil, litter forest was the second reserve for carbon (NMC), with an average of 45 Mg C ha⁻¹. Forest soils over sedimentary and metamorphic rocks had greater SOC contents (lower MBC proportion, higher C:N rates and lower microbial efficiency) than those observed in soils derived from pyroclastic material (lower C:N rate and greater microbial activity). Under *Pinus* species, there was less SOC than under the *Abies* genus, in whose forests there were herb and shrub strata with greater plant diversity that contributed to the increase in SOC.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2011. Aprobado: octubre, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 45: 849-862. 2011.

Keywords: pine and sacred fir forests, Mexican National Parks, biosphere reserve, forest soils.

Palabras clave: bosques de pino y oyamel, Parques Nacionales mexicanos, reservas de la biosfera, suelos forestales.

INTRODUCCIÓN

México posee sistemas montañosos geológica y tectónicamente variados (Macías, 2005) donde se desarrollan bosques de especies de los géneros *Pinus* y *Abies* sobre variadas condiciones topográficas y edáficas. Además de ocupar el primer lugar en biodiversidad y endemismos del género *Pinus* (Challenger, 2003), México conserva también formaciones forestales relictas de bosques boreales como el género *Abies* (Brower, 1999; CONABIO, 2010) que se distribuyen en pequeñas islas, dentro o en las inmediaciones de áreas naturales protegidas (ANPs), donde los ecosistemas conservados pueden compararse con otros cuyas relaciones entre componentes físicos y bióticos estén alterados (CONANP, 2010). En las áreas naturales protegidas, sean parques nacionales (PNs) o reservas de la biosfera (RsB), la conservación de los bosques tiene especial importancia debido a su fragilidad (Grace, 2004) y porque al degradarse se altera la dinámica del ciclo del C ante pérdidas aceleradas de materia orgánica del suelo (MOS). El carbono orgánico del suelo (COS) está reconocido como un indicador de sostenibilidad (Balbontín *et al.*, 2009) porque, entre otros factores, su acumulación resulta de la producción primaria neta (Purakayastha *et al.*, 2008) y también porque con la captura de carbono en el suelo se mitiga el calentamiento global al disminuir la concentración de gases con efecto invernadero (Lal, 2004). La cantidad de biomasa microbiana del suelo, como reserva de carbono lábil y almacén de nutrientes es otro indicador de sostenibilidad sensible a cambios que alteran el equilibrio de los ecosistemas (Li *et al.*, 2004).

Los antecedentes descritos y los escasos estudios de los suelos bajo vegetación boscosa de *Pinus* y *Abies* en México (principalmente respecto a los contenidos de COS en suelos pocos profundos), y el desconocimiento tanto de los contenidos de C_{bm} y de C_{nm} como de los valores de coeficientes metabólicos (qCO₂), motivaron esta investigación con el fin de contribuir al mantenimiento de los bosques templados mexicanos y de los servicios ambientales que brindan.

El objetivo del presente estudio fue determinar los efectos del material parental del suelo y la dominancia de las especies de los géneros *Pinus* o *Abies* sobre los

INTRODUCTION

México presents mountain systems that are diverse in both geologic and tectonic terms (Macías, 2005), where forests of the *Pinus* and *Abies* genera develop over various topographic and soil conditions. In addition to occupying the first place in biodiversity and endemic species for the *Pinus* genus (Challenger, 2003), México also conserves relict forest formations of boreal forests such as the *Abies* genus (Brower, 1999; CONABIO, 2010) that are distributed in small islands within or around natural protected areas (NPAs), where conserved ecosystems can be compared to others whose relationships between physical and biotic components are altered (CONANP, 2010). In natural protected areas, whether they are national parks (NPs) or biosphere reserves (BRs), conservation of forests has special importance due to their fragility (Grace, 2004) and because when they degrade, the dynamics of the C cycle are altered in face of accelerated organic matter losses from the soil (OMS). Soil organic carbon is recognized as an indicator of sustainability (Balbontín *et al.*, 2009) because, among other factors, its accumulation is the result of the net primary production (Purakayastha *et al.*, 2008) and also because global warming is mitigated with carbon (SOC) capture by the soil, decreasing the greenhouse-effect gas concentration (Lal, 2004). The amount of microbial biomass in the soil, as a reserve of labile carbon and nutrient storage, is another sustainability indicator sensitive to changes that alter the equilibrium in ecosystems (Li *et al.*, 2004).

The antecedents described and the scarce studies of soils under *Pinus* and *Abies* forest vegetation in México (primarily with regards to SOC contents in shallow soils), and the lack of knowledge regarding the contents of both MBC and NMC, and the metabolic coefficient values (qCO₂), motivated this research with the goal of contributing to maintaining Mexican temperate forests and the environmental services they provide.

The objective of this study was to determine the effects of the soil parental material and the dominance of species from the *Pinus* and *Abies* genera on SOC contents, and on the MBC, NMC and qCO₂ fraction in soils that are almost always shallow, formed over rocks of different geological origin in the Sierra Madre

contenidos de COS, y de la fracción de Cbm, Cnm y qCO₂ en suelos casi siempre someros, formados sobre rocas de distinto origen geológico en las Sierras Madre del Sur, Madre Oriental, Madre Occidental y Cinturón Volcánico Transmexicano. La hipótesis fue que bajo vegetación de coníferas (géneros *Pinus* y *Abies*) las diversas condiciones ecológicas y edáficas influyen sobre los contenidos del COS, Cbm, Cnm y qCO₂ en suelos someros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las áreas naturales protegidas (ANPs) estudiadas se muestran en el Cuadro 1 y el estudio de campo se realizó entre 2004 y 2009. El diseño experimental fue de parcelas seleccionadas al azar ubicadas dentro de las ANPs para determinar los contenidos de COS, Cbm, Cnm y qCO₂, analizando las variaciones que sufren en función de: 1) sitio (que conjuga rasgos geológicos, edáficos y

del Sur, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental and the Cinturón Volcánico Transmexicano. The hypothesis was that under conifer vegetation (*Pinus* and *Abies* genera), the diverse ecologic and soil conditions influence the SOC, MBC, NMC and qCO₂ contents in shallow soils.

MATERIALS AND METHODS

The natural protected areas (NPAs) studied are shown in Table 1 and the field study was performed between 2004 and 2009. The experimental design was of randomly selected plots located within the NPAs to determine the SOC, MBC, NMC and qCO₂ contents, by analyzing the variations that they suffer in function of: 1) site (which brings together geology, soil and climate features), and 2) genus and species. One hundred and eighty seven sites were selected with mature stands of the *Pinus* and *Abies* genera, where tree density (number of individuals with

Cuadro 1. Geología, altitud y suelos de los sitios de estudio seleccionados (México).

Table 1. Geology, altitude and soils in the study sites selected (México).

Áreas de estudio [†]	Altitud (intervalo en m)	Tipos de roca dominante	Grupos de suelos [‡]
R.B. El Cielo (RBEC)	1300-2000	Rocas calizas sedimentarias	<i>Regosol calcárico, Leptosol rendzicos</i>
R.B. Sierra Manantlán (RBSM)	1900-2400	Roca metamórfica e ígnea y complejo metamórfico	<i>Regosol, Cambisol, Feozem</i>
P.N. Izta-Popo (PNIP)	2400-3900	Andesita-dacita, riolita, toba basáltica y ceniza pómez.	<i>Litosol, Regosol, Andosol</i>
P.N. Zoquiapan (PNZA)	2800-3600	Andesita, andesita-dacita, riolita, toba andesítica	<i>Litosol, Regosol, Andosol</i>
Volcán Ajusco (VAj)	>3000-3500	Andesita-dacita, riolita, toba andesítica	<i>Cambisol, Andosol, Leptosol</i>
P.N. Nevado Toluca (PNNT)	>3000-3500	Andesita, dacitas, tetra-andesítica y toba andesítica	<i>Andosol</i>
P.N. Benito Juárez (PNBJ)	1800-3215	Roca sedimentaria, complejo metamórfico	<i>Cambisol, Luvisol y Leptosol</i>
P.N. Nevado Colima (PNNC)	>2600-3000	Basalto, andesita-dacita, hornblenda y ceniza pómez	<i>Leptosol, Regosol</i>
Mil C., M. Monarca (MCMM)	>3000-3500	Andesita, andesita-dacita, riolita, toba andesítica	<i>Andosoles ócrico y húmico</i>

[†] R.B.: reserva de biósfera; P.N.: parque nacional; Mil C., M. Monarca: Mil Cumbres mariposa monarca. ♦ R.B.: biosphere reserve; P.N.: national park; Mil C. M. Monarca: Mil Cumbres monarca butterfly.

[‡] (INEGI, 2009).

climáticos), y 2) género y especie. Se seleccionaron 187 sitios con rodales maduros de especies de los géneros *Pinus* y *Abies* determinando densidad arbórea (número de individuos con diámetro superior a 5 cm m⁻²), altura de árboles (en m), diámetro a la altura del hombro (DAH, a 1.30 m en cm) y especie (Espinosa, 1979).

El muestreo de suelo se realizó con base en los métodos usados por el inventario nacional forestal (CONAFOR, 2009) pero debido al relieve irregular e inclinación de los sitios, en lugar de círculos de 1000 m², se trazaron cuadrantes de 50 m × 20 m perpendiculares a la pendiente. En ellos se recolectaron al azar seis submuestras de suelo entre 0 y 20 cm de profundidad retirando el mantillo, se formaron muestras compuestas secadas al aire, se tamizaron (malla 2 mm) y almacenaron según indicaciones del USDA-NRCS (2004). También al azar se recolectó suelo entre 0 y -10 cm con cilindros de PVC que se sellaron, almacenaron a 4 °C y se determinó C_{bm} y qCO₂ antes de dos semanas.

En dos cuadros de 0.25 m × 0.25 m dentro de los transectos perpendiculares se determinó también el peso fresco del mantillo y su contenido en humedad (para corrección de biomasa) y se secó a 65 °C hasta peso constante. El contenido de C_{nm} se obtuvo mediante el producto:

$$C_{nm} = \text{biomasa seca} \times 0.58$$

En muestras de suelo (0 a -20 cm) se determinaron por triplicado textura, pH, N total (N_t) y MOS (métodos AS-02, AS-09, AS-25 y AS-07 de la NOM-021-RECNAT-2000). La densidad aparente (D_{ap}) se determinó en muestras edáficas inalteradas con el método del cilindro, y el contenido de COS se evaluó con la relación:

$$\text{Peso de COS} = [(\text{peso del suelo}) \times (\text{proporción de C en MOS})]$$

Debido a los valores ácidos (entre fuerte y muy fuerte) del pH edáfico y la ausencia de carbonatos en seis de las nueve áreas naturales estudiadas, no se consideró la contribución del C inorgánico en la determinación del contenido de carbono en estos suelos someros (White *et al.*, 1999). En la capa edáfica de 0 a 10 cm de espesor se cuantificó C_{bm} por cuadruplicado usando el método de fumigación-incubación (NRCS, 2004). Para calcular el qCO₂ se usó la siguiente relación:

$$qCO_2 = C_{bm}/COS$$

Análisis estadísticos

Con base al diseño experimental se hicieron análisis de varianza para determinar los factores (sitio: ANP; género: GEN; o especie: ESP) que influyeron en el contenido del COS, en C_{bm},

a diameter of more than 5 cm m⁻²), tree height (in m), diameter at shoulder's height (DSH, at 1.30 m in cm), and species were determined (Espinosa, 1979).

Soil sampling was carried out based on the methods used by the national forest inventory (CONAFOR, 2009), but due to the irregular relief and inclination at the sites, instead of 1000 m² circles, quadrants of 50 m × 20 m were traced, perpendicular to the slope. Within these, six soil subsamples were randomly collected at 0 to 20 cm depth by eliminating the litter, forming composite samples that were air-dried, sifted (2 mm mesh) and stored according to indications by USDA-NRCS (2004). Also randomly, soil was collected at 0 to -10 cm with PVC cylinders that were sealed and stored at 4 °C; MBC and qCO₂ were determined before two weeks went by.

In two squares of 0.25 m × 0.25 m within the perpendicular transects, the fresh weight of litter and its moisture content were determined (to correct for biomass), and it was dried at 65 °C until constant weight. The NMC content was obtained through the following product:

$$NMC = \text{dry biomass} \times 0.58$$

In soil samples (0 to -20 cm) the following were determined by triplicate: pH, total N (N_t) and OMS (methods AS-02, AS-09, AS-25 and AS-07 of the NOM-021-RECNAT-2000). The bulk density (Bd) was determined in unaltered soil samples with the cylinder method, and the SOC content was evaluated with the following relation:

$$SOC \text{ weight} = [(\text{soil weight}) \times (\text{C proportion in OMS})]$$

Due to the acidic values (between strong and very strong) of the soil pH, and the null presence of carbonates in six out of the nine natural areas studied, the contribution of inorganic C was not considered in determining the carbon content of these shallow soils (White *et al.*, 1999). In the soil layer of 0 to 10 cm thick, MBC was quantified by quadruplicate using the fumigation-incubation method (NRCS, 2004). To calculate the qCO₂, the following relation was used:

$$qCO_2 = MBC / SOC$$

Statistical analyses

Based on the experimental design, variance analyses were carried out to determine the factors (site: NPA; genus: GEN; or species: SP) that influenced the SOC contents on MBC, NMC and qCO₂ coefficient. In addition, the Tukey test (p ≤ 0.05) was used to determine differences between the mean variables.

Cnm y el coeficiente qCO_2 . Además se usó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para determinar diferencias entre las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 2 muestra los datos medios de altura, DAH (m) y densidad (número de individuos m^{-2}) de las especies arbóreas procurando una condición de madurez en (la mayoría de) los rodales estudiados.

Algunas especies del género *Pinus* tuvieron amplia distribución altitudinal y se observó *P. pseudostrobus* de 1800 a 2000 m en la Reserva de Biósfera El Cielo (RBEC) y entre 2800 y 3200 m en los parques nacionales Izta-Popo y Zoquiapan y los alrededores en diferentes regímenes de humedad, aunque esta especie, a diferencia de otras de este género, se asocia con ambientes menos húmedos (Alba-López *et al.*, 2003).

Pinus montezumae se encontró coexistiendo con *P. teocote* y *P. patula* entre 2600 y 3000 m, donde la temperatura media anual oscila entre 11 y 18 °C en zonas boscosas de montaña (Eguiluz-Piedra, 1982), mientras que *P. hartwegii* casi siempre se observó a más de 3300 m (Cuadro 2) porque esta especie no es afectada por baja temperatura (media anual cercana a 8 °C) atribuida al viento en esa altitud. Con respecto a su distribución altitudinal, Cabrera (2002) cita que las variables climáticas definen las áreas de distribución, pisos altitudinales y límites de sobrevivencia de especies y comunidades. La distribución observada

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 shows the average data for height, DSH (m) and density (number of individuals m^{-2}) of the tree species, attempting to have a condition of maturity in (most) of the stands studied.

Some of the *Pinus* species had a broad altitudinal distribution and *P. pseudostrobus* was observed at 1800 to 2000 m in the biosphere reserve El Cielo (RBEC) and between 2800 and 3200 m in the Izta-Popo and Zoquiapan national parks, and surroundings, in different soil moisture regimens, although this species, in contrast with others in this genus, is associated with less humid environments (Alba-López *et al.*, 2003).

Pinus montezumae was found coexisting with *P. teocote* and *P. patula* at between 2600 and 3000 m, where the annual average temperature ranges between 11 and 18 °C in mountainous forest zones (Eguiluz-Piedra, 1982), while *P. hartwegii* was almost always observed above 3300 m (Table 2) because this species is not affected by low temperature (annual average close to 8 °C) attributed to cold wind at this altitude. With regards to its altitudinal distribution, Cabrera (2002) cites that climate variables define the distribution areas, altitudinal levels and survival limits for species and communities. The distribution observed coincides with the observation by Sánchez (2008) that forests that are purely of the *Pinus* genus

Cuadro 2. Diámetro (DAH), altura y densidad de árboles en sitios del estudio (México).

Table 2. Tree diameter (DSH), height and density in the study sites (México).

Áreas de estudio	Especies con mayor abundancia por sitio	DAH (m)	Altura (m)	Densidad (árboles ha^{-1})
[†] RBEC	<i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i> y <i>Abies vejarii</i>	0.4	25	351
[†] RBSM	<i>Pinus douglasiana</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. oocarpa</i> , <i>P. rudis</i>	0.42	30.9	369
[*] PNIP	<i>P. montezumae</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>P. ayacahuite</i> , <i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	0.3	26	261
[*] PNZA	<i>Pinus pseudostrobus</i> , <i>P. patula</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	0.3	17	152
[*] VAj	<i>P. montezumae</i> , <i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	0.3	28	194
[*] PNNT	<i>P. montezumae</i> , <i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	0.5	33	247
[§] PBNJ	<i>P. teocote</i> , <i>P. lawsoni</i> , <i>P. ayacahuite</i> , var. Oaxacana, <i>P. hartwegii</i> y <i>A. religiosa</i>	0.3	22	400
[§] PNNC	<i>P. patula</i> , <i>P. pseudostrobus</i> y <i>A. religiosa</i>	0.6	32	360
[§] MCMM	<i>P. patula</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. montezumae</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>A. religiosa</i> y <i>Cupressus sp.</i>	0.3	35	257

El significado de los símbolos de la columna Áreas de estudio se muestra en el Cuadro 1. ♦ Meaning of symbols in column Áreas de estudio is shown in Table 1.

[†]Templado subhúmedo ♦ Temperate subhumid.

^{*}Templado húmedo con lluvias en verano ♦ Temperate humid with summer rains.

[§]Templado con lluvias en todas las estaciones ♦ Temperate with rains in all seasons.

concuera con la cita de Sánchez (2008) de que los bosques puros del género *Pinus* dominan en las cimas montañosas de México. Delgado y Piñero (2002) con el propósito de sugerir estrategias de manejo y conservación encontraron una amplia distribución de *P. montezumae* (2300 a 3100 m) y *P. pseudostrobus* (2010 a 3000 m) en México y Guatemala.

El género *Abies*, en comparación con el de *Pinus*, mostró una presencia más restringida, observando a la especie *A. religiosa* principalmente en cañadas húmedas y hacia lugares altos (cerca y por arriba de 3000 m). Según Nava *et al.* (2006), por la composición de terpenos de tejido foliar, las poblaciones del género *Abies* del norte y sur del país difieren isoenzimáticamente y se sitúan en dos grupos bien definidos en un árbol fenético.

En la RBEC, a menor altitud que la de los sitios donde abunda *A. religiosa* (cerca de 2000 m de altitud y temperatura media anual mayor a 11 °C), se observó a la especie *A. vejarii* restringida a cañadas húmedas expuestas al noreste donde hay corrientes de vientos alternados del norte y húmedos del golfo de México (Cuadro 2) y suprimida ante una dominancia de especies del género *Pinus*. Al respecto, Encina-Domínguez (2008) cita resultados semejantes para bosques de oyamel de la sierra de Zapalín, Coahuila.

En el Cuadro 3 se muestran algunas de las propiedades edáficas evaluadas. En todos los sitios se observaron texturas francas y baja Dap (0.7 a 0.9 Mg m⁻³)

dominate mountain peaks in México. Delgado and Piñero (2002), with the goal of suggesting management and conservation strategies, reported a broad distribution of *P. montezumae* (2300 to 3100 m) and *P. pseudostrobus* (2010 to 3000 m) in México and Guatemala.

The *Abies* genus, as compared to the *Pinus* genus, showed a more restricted presence, and the species *A. religiosa* was observed primarily in humid gullies and toward high locations (near and above 3000 m). According to Nava *et al.* (2006), because of the terpene composition in the leaf tissue, populations of the *Abies* genus in the north and south of the country differ isoenzymatically and are placed in two well-defined groups in a phenetic tree.

In the RBEC, at a lower altitude than the sites where *A. religiosa* abounds (close to 2000 m of altitude and annual average temperature over 11 °C), the species *A. vejarii* was observed, restricted to humid gullies exposed to the northeast where there are alternating north and humid wind currents from the Gulf of México (Table 2), and suppressed when faced with dominance by species from the *Pinus* genus. With regards to this topic, similar results Encina-Domínguez (2008) cites similar results for sacred fir forests in Sierra Zapalín, in Colima.

In Table 3, some of the soil properties evaluated are shown. In all the sites, loamy textures were observed and a low Bd (0.7 to 0.9 Mg m⁻³) that did not show significant differences ($p > 0.05$). The texture and

Cuadro 3. Valores medios de algunas propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas de los suelos seleccionados (México).
Table 3. Average values of some physical, physicochemical and chemical properties in the soils selected (México).

Área de estudio	Textura	Densidad aparente (Mg m ⁻³)	pH (1:2) suelo (H ₂ O)	COS (KCl 1N)	N total (mg C g ⁻¹)	(mg N g ⁻¹)
RBEC	FA	0.72 a	5.4 bc	4.5 b	109 a	2.7 c
RBSM	FAA	0.78 a	6.2 a	4.9 a	48.1 c	2.3 d
PNIP	FA	0.82 a	5.7 b	4.7 ab	41.8 c	2.2 d
PNZA	F	0.80 a	5.7 b	5.0 a	43.5 c	3.3 c
VAj	FA	0.76 a	5.0 c	4.7 ab	60.3 bc	4.3 b
PNNT	FA	0.66 a	4.9 c	4.6 b	73.1 b	5.1 a
PNBJ	FA	0.91 a	5.1 c	4.8 c	47.2 c	2.7 d
PNNC	FA	0.88 a	5.8 a	4.8 a	35.4 c	2.8 cd
MCMM	FA	0.64 a	5.3 bc	4.7 ab	84.1 b	4.5 b

El significado de los símbolos de la columna Áreas de estudio se muestra en el Cuadro 1. ♦ Meaning of symbols in column Áreas de estudio is shown in Table 1.

FA: Franco arenoso; F: Franco; FAA: Franco arcillo-arenoso ♦ FA: Loamy sand; F: Loamy; FAA: Loamy clay-sand.

En cada columna, promedios con diferente letra son significativamente diferentes ($p \leq 0.005$) ♦ In each column, averages with different letters are significantly different ($p \leq 0.005$).

que no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$). La textura y Dap encontradas en el presente estudio, concuerdan con las observadas por Richardson (2005) al estudiar la ecología y la biogeografía del género *Pinus*, mientras que Ángeles y López (2009) indican que bajo abetales del Parque Nacional el Chico, Hidalgo, México, hay suelos con texturas tipo limoso-arenoso, arcillo-arenoso y arenoso.

Por la presencia de las distintas especies, las variaciones asociadas al material de origen de los suelos y diversas condiciones climáticas debidas a la altitud, se observó que los valores de pH, COS y Nt sí mostraron diferencias significativas entre las diversas áreas estudiadas en los parques nacionales, reservas de la biosfera y en sitios bajo sus áreas de influencia.

De acuerdo con el pH se clasificaron los suelos como moderadamente ácidos y sólo los del PNNT tuvieron la categoría de fuertemente ácidos. Estos últimos (así como los de los parques nacionales Izta-Popo, Zoquiapan y zonas anexas, Volcán Ajusco y Nevado de Colima) proceden de rocas ácidas (andesita-dacita), mientras que algunos suelos del parque nacional Benito Juárez y la mayoría de los de las reservas de la biosfera Sierra de Manantlán y El Cielo presentaron moderada acidez porque se han desarrollado sobre material metamórfico y sedimentario (Martínez y Ramírez, 1998). El Cuadro 1 muestra los principales tipos de suelo en cada región estudiada y se puede deducir que la moderada y fuerte acidez en primera instancia debe atribuirse a la materia orgánica del suelo porque en todos ellos su contenido es alto. En los Andosoles desarrollados de rocas andesitas, dacita, riolita, conglomerado basáltico y ceniza volcánica, la acidez se atribuye también a la alta reactividad y área superficial de minerales amorfos y de óxidos microcristalinos que participan activamente con cargas dependientes del pH mediante fenómenos de superficie donde hay liberación de iones H^+ u OH^- (Paterson *et al.*, 1991).

Con los resultados mostrados en el Cuadro 4 se analizó primero el efecto del origen geológico del suelo observándose una relación de éste y la altitud con el contenido de COS.

Al analizar el COS de los suelos formados de roca sedimentaria y complejos metamórficos (de las reservas de la biosfera Sierra de Manantlán y El Cielo y de algunos suelos de zona baja del Parque Nacional Benito Juárez) se encontró un promedio de 147 Mg C ha^{-1} que fue 43.5 % mayor que el observado en los

Bd found in the present study coincide with those observed by Richardson (2005) when studying the ecology and biogeography of the *Pinus* genus, while Ángeles and López (2009) indicate that under spruce forests in the National Park El Chico, in Hidalgo, México, there are soils with silt-sand, clay-sand and sand textures.

Because of the presence of the different species, variations associated to the original material in the soils and diverse climate conditions due to altitude, it was observed that the pH, SOC and Nt values did show significant differences between the different areas studied in the national parks, biosphere reserves and in sites under their areas of influence.

Based on the pH, soils were classified as moderately acidic and only those in the Nevado de Toluca National Park (PNNT) had the category of strongly acidic. The latter (as well as those in the parks Izta-Popo, Zoquiapan and surrounding areas, Volcán Ajusco and Nevado de Colima) come from acid rocks (andesite-dacite), while some soils from the Benito Juárez national park (PNBJ) and most of those from the biosphere reserves Sierra de Manantlán (RBSM) and El Cielo (RBEC) presented moderate acidity because they have developed over metamorphic and sedimentary material (Martínez and Ramírez, 1998). Table 1 shows the primary types of soils in each region studied, and it can be deduced that at first, the moderate and strong acidity should be attributed to the organic material in the soil because its content is high in all of them. In the Andosol soils developed from andesite, dacite, and rhyolite rocks, basaltic conglomerate and volcanic ash, acidity is also attributed to the high reactivity and superficial area of amorphous minerals and microcrystalline oxides that actively participate with charges dependent on pH through surface phenomena where H^+ or OH^- ions are liberated (Paterson *et al.*, 1991).

With the results shown in Table 4, the effect of the geologic origin of the soil was analyzed first, and a relationship between it and the altitude with the SOC content was observed.

When analyzing the SOC associated to sedimentary rock and metamorphic complexes (from the biosphere reserves Sierra de Manantlán and El Cielo and some soils in the low zone of the Benito Juárez National Park), an average of 147 Mg C ha^{-1} was found that was 43.5% higher than the one observed in the soils of mountain peaks derived from igneous rock (83.5 Mg

Cuadro 4. Contenido de carbono orgánico (COS) y fracciones en suelos forestales de los ANPs mexicanas.
Table 4. SOC content and fractions in forest soils of Mexican NPAs.

Áreas de estudio	COS		Cbm		Cnm	
	(Intervalo)	media ± DE	(Intervalo)	media ± DE	(Intervalo)	media ± DE
	(Mg C ha ⁻¹)		(Mg C ha ⁻¹)		(Mg C ha ⁻¹)	
RBEC	(65-332)	138 ± 81 b	(0.1-0.8)	0.4 ± 0.02 c	(11-101)	38 ± 27 b
RBSM	(8.0-404)	146 ± 107 b	(0.2-0.8)	0.6 ± 0.2 c	(13-37)	24 ± 8.0 b
PNIP	(23-238)	89 ± 59 d	(1.0-6.0)	3.0 ± 1.0 a	(12-357)	118 ± 106 a
PNZA	(19-208)	109 ± 53 c	(0.26-4.8)	2.0 ± 1.0 b	(12-117)	32 ± 19 b
VAj	(55-90)	78 ± 13 d	(0.5-1.2)	0.9 ± 0.3 b		(N.d.)
PNNT	(52-145)	89 ± 34 d	(0.01-0.4)	0.3 ± 0.1 d		(N.d.)
PNBJ	(73-428)	157 ± 136 a	(0.01-5.0)	1.0 ± 0.9 b	(7-18)	13 ± 4.0 b
PNNC	(38-50)	42 ± 5.0 e	(0.4-1.0)	0.7 ± 0.3 c		(N.d.)
MCMM	(37-160)	94 ± 58 d	(0.1-0.2)	0.2 ± 0.04 d		(N.d.)
Media general		105 ± 35.2		0.91 ± 0.41		44.9 ± 41.9

El significado de los símbolos de la columna Áreas de estudio se muestra en el Cuadro 1. ♦ Meaning of symbols in column Áreas de estudio is shown in Table 1.

En cada columna, promedios con diferente letra son significativamente diferentes ($p \leq 0.005$) ♦ In each column, averages with different letters are significantly different ($p \leq 0.005$).

(N. d.): no determinados. Para expresar contenido de C en kg C m⁻² se divide entre 10 el valor expresado en Mg C ha⁻¹ ♦ not determined. To express the C content in kg C m⁻², the value expressed in Mg C ha⁻¹ is divided by 10.

suelos de cimas montañosas derivados de roca ígnea (83.5 Mg C ha⁻¹) de los parques nacionales Izta-Popo, Nevado de Toluca, Zoquiapan y zonas anexas, Volcán Ajusco y Nevado de Colima (Cuadro 4).

En suelos derivados de roca sedimentaria y complejos metamórficos, la mayor acumulación de carbono orgánico puede ser consecuencia de que el CaCO₃ presente en rocas sedimentarias y complejos metamórficos, bloquea la humificación (Cuadro 4). Lo anterior contribuye a una fuerte incorporación en el perfil del suelo de humus poco evolucionado (mull carbonatado) donde dominan compuestos poco transformados que aumentan gradualmente los contenidos de carbono (Duchaufour, 1984). En estas regiones donde las rocas sedimentarias y metamórficas son dominantes, también puede presentarse menor velocidad de mineralización de la MOS que provoca acumulación en el suelo por tener clima menos húmedo que los sitios donde predominan rocas ígneas subyacentes a Andosoles las cuales son suelos con un edafoclima húmedo pero relativamente drenados (Duchaufour, 1984).

En los suelos derivados de complejos metamórficos y sedimentarios, la mayor acumulación de COS (Cuadros 3 y 4) y, proporcionalmente un menor contenido de Nt (Cuadro 3), son elementos justificantes de una mayor relación C:N (en RBSM 21:1 y en RBEC 40:1) en comparación con la razón C:N

C ha⁻¹) from the national parks Izta-Popo, Nevado de Toluca, Zoquiapan and surrounding areas, Volcán Ajusco and Nevado de Colima (Table 4).

In soils derived from sedimentary rock and metamorphic complexes, the higher accumulation of organic carbon can be a consequence of the fact that CaCO₃ present in sedimentary rocks and metamorphic complexes, blocks humification (Table 4). This contributes to a strong incorporation in the soil profile of humus that is not very evolved (carbonated mull) where compounds that are not fully transformed dominate, which gradually increase carbon contents (Duchaufour, 1984). In these regions where sedimentary and metamorphic rocks are dominant, a lower mineralization rate of the OMS can also be present, causing accumulation in the soil because of the less humid climate in sites where igneous rocks predominate under Andosols that are soils with a humid soil climate although relatively drained (Duchaufour, 1984).

In soils derived from metamorphic and sedimentary complexes, the greatest accumulation of SOC (Tables 3 and 4) and, proportionately a lower Nt content (Table 3), are elements that justify a greater C:N relation (in RBSM 21:1 and in RBEC 40:1) in comparison with the average C:N ratio obtained from soils derived from dacite-andesitic and andesite rocks whose value is barely close to

promedio obtenida de los suelos derivados de roca dacítico-andesítica y andesita cuyo valor es apenas cercano a 15:1, aunque en estos suelos hubo menor acumulación de COS. Lo anterior confirma que los flujos de C del suelo dependen directamente de los de N debido a que las relaciones C:N altas (mayores de 30:1) limitan la descomposición de materiales orgánicos y la disponibilidad de N (Cuadro 5), mientras que aquellos con relación C:N entre 15:1 y 30:1 tienen un tiempo medio de residencia (TMR) menor (Jofre *et al.*, 2001; Baisden *et al.*, 2002; Ladd *et al.*, 2004).

Si bien el método analítico de medición del COS incluye al Cbm, es importante señalar que al cuantificar este último algunos sitios mostraron tendencia significativa (opuesta a la dinámica general que muestran los contenidos de COS), porque algunos suelos evolucionados sobre roca ígnea-andesítica tuvieron mayor contenido de Cbm pero los suelos formados sobre rocas sedimentarias y metamórficas fueron menores. Estos resultados muestran que bajo vegetación boscosa de especies de los géneros *Pinus* y *Abies* el contenido de Cbm, además de recibir la influencia de los factores asociados con altitud (gradientes térmicos, de humedad y presión), también la recibe de los factores relacionados al material parental del suelo (Cuadro 4). En estudios de dinámica de Cbm relacionados con fertilidad edáfica, los contenidos de Cbm (120 y 451 mg C kg⁻¹) fueron similares a los del presente estudio (Li *et al.*, 2004). Con datos equivalentes a los obtenidos en el presente estudio relativos a los cambios estacionales de valores de C, N y P en bosque mixto (*Quercus-Pinus*), Bijayalaxmi y Yadava (2006) reportan contenidos de Cbm de 71 a 1412 mg C kg⁻¹ y atribuyen este aumento a la hojarasca de *Quercus* depositada anualmente.

El contenido de Cnm (aunque sea una observación estacional que cambia anualmente) puede ser un indicador de la productividad de un bosque; sin embargo, en el momento de su determinación (verano e inicio de otoño) el promedio fue 45 Mg C ha⁻¹ (con valores de 13 a 118 Mg C ha⁻¹). En sitios con mayor elevación como en los parques nacionales Izta-Popo y Zoquiapan con suelos derivados de rocas ígneas, fue mayor el contenido de Cnm (75 Mg C ha⁻¹) y dos veces menos (24.8 Mg C ha⁻¹) en la reserva de la biosfera Sierra de Manantlán de menor altitud y suelos formados sobre material metamórfico (Cuadro 4).

Cuadro 5. Razón C:N y coeficiente metabólico (qCO₂) bajo vegetación de pino y oyamel.

Table 5. C:N ratio and metabolic coefficient (qCO₂) under pine and sacred fir vegetation.

Áreas de estudio	Relación C:N edáfica	qCO ₂
RBEC	40.4 a	0.0025 a
RBSM	20.9 b	0.0028 a
PNIP	19.0 b	0.0285 a
PNZA	13.2 c	0.015 a
VAj	14.0 c	0.011 a
PNNT	14.3 c	0.0025 a
PNBJ	17.5 b	0.006 a
PNNC	12.6 c	0.017 a
MCMM	18.7 b	0.0023 a

El significado de los símbolos de la columna Áreas de estudio se muestra en el Cuadro 1. ♦ Meaning of symbols in column Áreas de estudio is shown in Table 1.

En cada columna promedios con diferente letra son significativamente diferentes ($p \leq 0.005$) ♦ In each column, averages with different letters are significantly different ($p \leq 0.005$).

15:1, although there was less SOC accumulation in these soils. This confirms that the C flows in the soil depend directly on those of N because the high C:N relations (higher than 30:1) limit the decomposition of organic materials and the availability of N (Table 5), while those with a C:N relation between 15:1 and 30:1 have a shorter average residence time (ART) (Jofre *et al.*, 2001; Baisden *et al.*, 2002; Ladd *et al.*, 2004).

Although the analytic method to measure SOC includes MBC, it is important to point out that when quantifying the latter some sites showed a significant tendency (opposite to the general dynamics that SOC contents show), because some soils that evolved on igneous-andesitic rock had a greater content of MBC but the soils formed over sedimentary and metamorphic rocks had less. These results show that under forest vegetation of species from the *Pinus* and *Abies* genera, the MBC content in addition to receiving the influence of factors associated with altitude (gradients of temperature, humidity and pressure), they also receive it from factors related to the parent material in the soil (Table 4). In studies of MBC dynamics related to soil fertility, MBC contents (120 and 451 mg C kg⁻¹) were similar to those in this study (Li *et al.*, 2004). With data equivalent to those obtained in this study relative to seasonal changes in C, N and P values in mixed forest (*Quercus-Pinus*),

En el conjunto de sitios con suelo derivado de rocas ígneas la eficiencia microbiana (medida como qCO_2) fue casi diez veces mayor (0.029) al qCO_2 de suelos desarrollados de rocas sedimentarias y metamórficas (0.003). Mocali *et al.* (2008) señalan que el qCO_2 representa una eficiencia microbiana para mineralizar MOS. Ese planteamiento se confirma en el presente estudio donde el coeficiente qCO_2 fue alto en suelos ricos en COS. La relación alta C:N y los valores bajos de coeficientes metabólicos en suelos derivados de material sedimentario y metamórfico (RBSM, RBEC y los del PNB) permiten inferir una presencia de estrés microbiano, con lenta mineralización de restos orgánicos y, consecuentemente, mayor acumulación de COS (Cuadro 5).

En todos los suelos hay una correlación entre un aumento de la relación C:N y una menor mineralización de la materia orgánica. Según Duchaufour (1984), en diversos tipos de humus forestal cuando la relación C:N es mayor de 25 o 30 la mineralización es casi nula. En humus tipo mull carbonatado en suelos sobre rocas sedimentarias o complejos metamórficos la correlación señalada no aplica, y por tanto la mayor acumulación de COS en esos suelos se debe atribuir a los coeficientes metabólicos menores (Cuadro 5).

En el análisis del efecto que los géneros o especies tuvieron sobre el contenido de COS, se observó que el contenido promedio general fue 105 Mg C ha⁻¹ (de 42 a 157 Mg C ha⁻¹) y al comparar los géneros el mayor contenido fue bajo el género *Abies*. En los suelos bajo cobertura de individuos del género *Pinus*, el contenido promedio de COS fue 100 Mg C ha⁻¹, 21 Mg C ha⁻¹ bajo *P. ayacahuite* var. *oaxacana* y casi nueve veces más (180 Mg C ha⁻¹) en suelos bajo *P. rudis* (Cuadro 6). El contenido de COS tuvo una variación cercana a 1.5 veces entre los suelos bajo *A. religiosa* y *A. vejarii* (92 y 131 Mg C ha⁻¹).

Para la mayoría de las especies observadas de los géneros *Pinus* y *Abies*, en los suelos con mayor contenido de COS es mayor la concentración de Cbm. El contenido de Cbm (valor medio de 0.11 Mg C ha⁻¹) tuvo una variación cercana a 11 veces, desde 0.027 a 0.29 Mg C ha⁻¹ en suelos bajo *Pinus spp.* y *P. rudis*, mientras que los suelos bajo *A. vejarii* el contenido fue 0.27 Mg C ha⁻¹, valor casi cuatro veces mayor al encontrado en suelos bajo *A. religiosa* (Cuadro 6).

El material calizo-sedimentario de suelos bajo los cuales se encontró *P. rudis* y *A. vejarii* puede

Bijayalaxmi and Yadava (2006) report MBC contents of 71 to 1412 mg C kg⁻¹ and they attribute this increase to *Quercus* fallen leaves deposited annually.

The NMC content (although it is a seasonal observation that changes annually) can be an indicator of productivity in a forest; however, at the moment of its determination (summer and beginning of autumn) the average was 45 Mg C ha⁻¹ (with values of 13 to 118 Mg C ha⁻¹). In sites with a higher elevation, such as the Izta-Popo and Zoquiapan national parks with soils derived from igneous rocks, the NMC content was higher (75 Mg C ha⁻¹) and it was two times lower (24.8 Mg C ha⁻¹) at the biosphere reserve Sierra de Manantlán, of lower altitude and soils formed over metamorphic material (Table 4).

In the group of sites with soil derived from igneous rocks, the microbial efficiency (measured as qCO_2) was almost ten times greater (0.029) than the qCO_2 from soils developed from sedimentary and metamorphic rocks (0.003). Mocali *et al.* (2008) point out that the qCO_2 represents microbial efficiency to mineralize organic matter soil. This idea is confirmed in this study where the qCO_2 coefficient was high in soils rich in soil organic carbon. The high C:N relation and the low values for metabolic coefficients in soils derived from sedimentary and metamorphic material (RBSM, RBEC and PNB)

Cuadro 6. Contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) y Cbm en suelos bajo especies de los géneros *Pinus* y *Abies* (México).

Table 6. Soil organic carbon (SOC) and MBC in soils under species of the *Pinus* and *Abies* genera (México).

Especies	COS (Mg C ha ⁻¹)	Cbm (Mg C ha ⁻¹)
<i>Pinus rudis</i>	180	0.29
<i>Pinus pseudostrobus</i>	110	0.18
<i>Pinus douglasiana</i>	105	0.049
<i>Pinus pátula</i>	102	0.12
<i>Pinus hartwegii</i>	102	0.044
<i>Pinus teocote</i>	94	0.050
<i>Pinus montezumae</i>	76	0.11
<i>Pinus spp.</i>	71	0.027
<i>Pinus ayacahuite</i> var. <i>oaxacana</i>	21	0.032
<i>Abies vejarii</i>	131	0.27
<i>Abies religiosa</i>	92	0.066

Especie de los géneros *Pinus* y *Abies* ordenadas por su contenido decreciente de COS ♦ Species of the *Pinus* and *Abies* genera are ordered by decreasing SOC content.

ser un factor que contribuye a aumentar el Cbm en comparación con los suelos originados de ceniza volcánica debido a que sobre material geológico de tipo calcáreo la mineralización primaria es rápida, pero la secundaria es muy lenta (Duchaufour, 1984).

El promedio de los coeficientes metabólicos (qCO_2) en suelos desarrollados sobre roca ígnea fue casi siete veces mayor a su equivalente en suelos derivados de roca sedimentaria o metamórfica; sin embargo, no hubo diferencias significativas entre ANPs (Cuadros 5 y 6). Anderson y Domsch (1990) postulan que se obtienen altos valores de qCO_2 cuando hay un mayor aporte de sustratos frescos, lo cual fue más frecuente en el grupo de suelos con material parental de origen volcánico.

Los resultados (Cuadros 4, 5 y 6) permiten sustentar la hipótesis de que en ecosistemas forestales con bosques de coníferas, los suelos evolucionados de material ígneo acumulan menor contenido de COS, del cual una alta proporción es Cbm porque sus valores de qCO_2 fueron mayores comparados con los suelos formados de roca sedimentaria o metamórfica.

La hipótesis planteada tuvo otro elemento de sustento en los análisis de varianza que mostraron efectos significativos ($p \leq 0.05$) de sitio (ANPs) y especie (ESP) sobre el contenido de Cbm. También se observó un efecto significativo de sitio (ANPs) sobre el contenido de COS, de Cnm y sobre la relación C:N del suelo, aunque no hubo efecto significativo de los factores citados para el qCO_2 (Cuadro 7). Por tanto, es necesario estudiar el fraccionamiento de sustancias húmicas en estos suelos para conocer mejor la composición bioquímica de las sustancias húmicas que también influyen en su mineralización (Duchaufour, 1984).

En sitios ubicados sobre macizos montañosos con elevación mayor a 2500 m, algunos factores como la

allow inferring the presence of microbial stress, with slow mineralization of organic remains and, consequently, greater SOC accumulation (Table 5).

In all the soils there is a correlation between an increase in the C:N relation and a lower mineralization of organic matter. According to Duchaufour (1984), in various types of forest humus, when the C:N relation is higher than 25 or 30, mineralization is almost null. In carbonated mull humus types, in soils over sedimentary rocks or metamorphic complexes, the correlation mentioned does not apply, and therefore, the greater SOC accumulation in those soils should be attributed to lower metabolic coefficients (Table 5).

In the analysis of the effect that genera or species had on the SOC content, it was observed that the general average content was 105 Mg C ha^{-1} (42 to 157 Mg C ha^{-1}) and when comparing the genera, the greatest content was under the *Abies* genus. In the soils under cover of individuals from the *Pinus* genus, the average SOC content was 100 Mg ha^{-1} , 21 Mg C ha^{-1} under *P. ayacahuite* var. *oaxacana*, and almost nine times more (180 Mg C ha^{-1}) in soils under *P. rudis* (Table 6). Content of SOC showed a variation of almost 1.5 times between soils under *A. religiosa* and *A. vejarii* (92 and 131 Mg C ha^{-1}).

For most of the species observed from the *Pinus* and *Abies* genera, in soils with a greater SOC content, the MBC concentration is higher. The MBC content (average value of $0.11 \text{ Mg C ha}^{-1}$) had a variation of close to 11 times, from 0.027 to $0.29 \text{ Mg C ha}^{-1}$ in soils under *Pinus* spp. and *P. rudis*, while in soils under *A. vejarii* the content was $0.27 \text{ Mg C ha}^{-1}$, a value almost four times greater than the value found in soils under *A. religiosa* (Table 6).

The limy-sedimentary material of soils under *P. rudis* and *A. vejarii* can be a factor that contributes

Cuadro 7. Análisis de varianza del carbón orgánico del suelo (COS), biomasa microbiana (Cbm), carbón en mantilla (Cnm), C:N y coeficiente metabólico (qCO_2).

Table 7. Analysis of variance of soil organic carbon (SOC), microbial biomass (MBC), necromass carbon (MCN), C:N and metabolic coefficient (qCO_2).

Fuente de variación	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	Valor <i>F</i>	<i>p</i> ≤
COS	112	972682.3	8684.7	35.4	0.001
Cbm	50	2111714.6	42234.3	25.3	0.001
Cnm	43	51462.4	1196.8	7628.6	0.001
C:N	111	217424.2	1958.8	19.6	0.001
qCO_2	50	0.0034281	0.0000686	0.56	0.991

baja temperatura limitan la productividad forestal y pueden ser la causa de un menor contenido de COS, en comparación con la tendencia opuesta observada en sitios que no superan el piso altitudinal de los 2500 m donde el contenido de COS fue mayores, por lo que este aspecto requiere más estudios.

CONCLUSIONES

En las reservas de la biosfera El Cielo y Sierra de Manantlán, los suelos forestales con *Pinus rudis* y *Abies vejarii* y formados sobre rocas sedimentarias y metamórficas tuvieron mayores contenidos de COS (pero de éste, una menor proporción es Cbm), comparados con los andosoles y leptosoles derivados de rocas ígneas en diversas áreas naturales protegidas del centro del país (Cinturón Volcánico Transmexicano). Las relaciones C:N más altas en regosoles calcáricos y leptosoles rendzicos ubicados en El Cielo y Sierra de Manantlán fueron casi diez veces mayores respecto a las relaciones C:N de suelos derivados de rocas ígneas y ceniza volcánica, lo cual explica la mayor acumulación de COS en los suelos derivados de rocas sedimentarias y metamórficas, respecto a los suelos que evolucionan de rocas ígneas.

El contenido promedio general de COS bajo especies del género *Pinus* fue menor al encontrado en suelos bajo el de *Abies* porque existen, bajo las especies de este género, los estratos arbustivos y herbáceos que son poco frecuentes bajo la cobertura arbórea de los bosques de pino.

Los contenidos de COS y los coeficientes metabólicos (qCO_2) del suelo fueron afectados principalmente por el tipo de roca (material parental) sobre los que se desarrollan y, en menor grado, por el tipo de vegetación boscosa presente.

Los resultados de esta investigación sobre los contenidos de COS, Cbm, Cnm y qCO_2 aportaron elementos para no rechazar la hipótesis de que las diversas condiciones ecológicas y edáficas en bosques de pino y oyamel influyen sobre los contenidos de carbono en suelos someros.

AGRADECIMIENTOS

Al personal académico del Laboratorio de Fertilidad y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo,

to increase MBC as compared to the soils originated from volcanic ash, because primary mineralization is fast over geologic material of the limestone type, but the secondary is very slow (Duchaufour, 1984).

The average of metabolic coefficients (qCO_2) in soils developed over igneous rock was almost seven times higher than its equivalent in soils derived from sedimentary or metamorphic rocks; however, there were no significant differences between NPAs (Tables 5 and 6). Anderson and Domsch (1990) postulated that high values of qCO_2 are obtained when there is a higher contribution of fresh substrates, which was more frequent in the group of soils with parental material of volcanic origin.

The results (Tables 4, 5 and 6) allow sustaining the hypothesis that in forest ecosystems with conifers, soils evolved from igneous material accumulate lower SOC content, of which a high proportion is MBC because its qCO_2 values were greater when compared with soils formed from sedimentary or metamorphic rock.

The hypothesis proposed had another element that sustained it in the variance analyses that showed significant effects ($p \leq 0.05$) of sites (NPAs) and species (SP) on the MBC content. A significant effect was also observed of sites (NPAs) on SOC and NMC content, and on the C:N relation in the soil, although there was no significant effect of the factors mentioned for qCO_2 (Table 7). Therefore, it is necessary to study the fractioning of substances in the humus of these soils, in order to better understand their biochemical compositions which also influence their mineralization (Duchaufour, 1984).

In sites located over mountainous masses with elevation over 2500 m, some factors such as low temperature can limit forest productivity and can be the cause of a lower SOC content, when compared to the opposite tendency observed in sites that are no higher than the altitudinal level of 2500 m where the SOC content was higher. Therefore, this aspect requires more studies.

CONCLUSIONS

In the biosphere reserves El Cielo and Sierra de Manantlán, forest soils with *Pinus rudis* and *Abies vejarii*, formed over sedimentary and metamorphic rocks, had greater SOC contents (although in it,

por las facilidades y apoyo para el uso de sus instalaciones en la realización de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Alba-López, M. P., M. González-Espinosa, N. Ramírez-Marcial, y M. A. Castillo-Santiago. 2003. Determinantes de la distribución de *Pinus* spp. en la Altiplanicie Central de Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 73: 7-15. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57707301>. (Consulta: septiembre del 2011).
- Anderson, T. H., and K. H. Domsch. 1990. Application of ecophysiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomass from soils of different cropping histories. *Soil Biol. Biochem.* 22: 251-255.
- Ángeles-Cervantes E., y López-Mata L. 2009. Supervivencia de una cohorte de plántulas de *Abies religiosa* bajo diferentes condiciones postincendio. *Bol.Soc.Bot.Méx.* 84: 25-33.
- Baisden, W. T., R. Amundson, A. C. Cook, and D. L. Brenner. 2002. Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils. *Global Biogeochem. Cycles*. 16: 117-132.
- Balbontin C., C., O. Cruz, F. Paz, and J. Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of México. In: *Soil carbon sequestration and the greenhouse effect*, 2ª. ed. SSA Special Publication 57. ASA-CSSA-SSSA. Madison, Wisconsin, USA. pp 71-96.
- Bijayalaxmi, N. D., and P. S. Yadava. 2006. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Appl. Soil Ecol.* 3: 220-22.
- Brower, L. P. 1999. Los bosques de oyamel en México y la hibernación de las monarcas. In: *Para comprender la migración de la mariposa monarca 1857-1995*. México. <<http://www2.inec.gob.mx/publicaciones/libros/121/oyamel.html>> (Consulta: diciembre del 2009).
- Cabrera H., M. 2002. Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de alta montaña. *Revista Chilena de Historia Natural* 75: 625-637.
- Challenger, A. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México su estado de conservación. <www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/tipos_valle.html> (Consulta: febrero de 2010).
- CONABIO. Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad. 2010. www.conabio.gob.mx/html (Consulta: febrero del 2009).
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2009. Manual y procedimientos para el muestreo de campo. (Remuestreo 2009). CONAFOR, México. 140 pp.
- CONANP. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2010. <www.conanp.gob.mx> (Consulta: noviembre del 2009).
- Delgado P., y D. Piñero. 2002. Sistemática filogeográfica y sus aplicaciones a la evolución y conservación de los bosques de coníferas en México: El caso de *Pinus montezumae* y *Pinus pseudostrobus*. *Acta Universitaria* 12 (2): 3-19.
- Duchaufour P. 1984. Edafología. Edafogénesis y Clasificación. Masson, Barcelona, España. 493 p.
- Encina-Domínguez, J. A., F. J. Encina D., E. Mata R., J. Valdés R. 2008. Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del bosque de oyamel de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 83: 13-24.
- Eguiluz-Piedra, T. 1982. Clima y distribución del género *Pinus*. *Ciencia Forestal*. 7: 30-44.
- a lower proportion is MBC), compared to the andosols and leptosols derived from igneous rocks in various natural protected areas in the center of the country (Cinturón Volcánico Transmexicano). The higher C:N relations in calcareous regosols and rendzic leptosols located at El Cielo and Sierra de Manantlán were almost ten times higher with regards to the C:N relations in soils derived from igneous rocks and volcanic ashes, which explains the greater accumulation of SOC in soils derived from sedimentary and metamorphic rocks as compared to the soils that evolve from igneous rocks.
- The general average content of SOC under species of the *Pinus* genus was lower than that found in soils under *Abies* because there are, under species of this genus, shrub and herb strata that are less frequent under the tree cover of pine forests.
- The SOC contents and metabolic coefficients (qCO₂) in the soil were affected primarily by the type of rock (parental material) over which they develop and, to a lesser degree, by the type of forest vegetation present.
- Results from this study regarding the SOC, MBC, NMC and qCO₂ contents contribute elements to not reject the hypothesis that diverse ecologic and soil conditions in pine and spruce forests influence carbon contents in shallow soils.

—End of the English version—



- Espinosa de G., J. 1979. *Gymnospermae*. In: Rzedowski, J., y G. C. Rzedowski (eds). *Flora Fanerogámica del Valle de México*. CECSA. Méx. D. F. pp: 63-76.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 2009. Principales suelos en México. <<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/fisigeo/principa.cfm>> (Consulta: febrero del 2010).
- Grace, J. 2004. Understanding and managing the global carbon cycle. *J. Ecol.* 92: 189-202.
- Joffre, R., I. A. Göran, D. Gillon, and E. Bosatta. 2001. Organic matter quality in ecological studies: theory meets experiment. *Oikos* 93: 451-458.
- Ladd J. N., M. Amato, and H. A. Van Veen. 2004. Soil microbial biomass: Its assay and role in turnover of organic matter C and N. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1369-1372.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123 (2): 1-22.

- Li Feng-Min, Songa Qiu-Hua, Jjemba P. K., and Shi Yuan-Chun. 2004. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro-ecosystem. *Soil Biol. Biochem.* 36: 1893-1902.
- Macías J., L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica de México. Temas Selectos de la Geol. Mex.* 17: 379-424.
- Martínez R., L. M., y J. M. Ramírez R. 1998. Unidades fisiográficas de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán bajo un sistema de información geográfica. *Terra* 16: 195-203.
- Mocali, S., D. Paffetti, G. Emiliani, A. Benedetti, and R. Fani. 2008. Diversity of heterotrophic aerobic cultivable microbial communities of soils treated with fumigants and dynamics of metabolic, microbial, and mineralization quotients. *Biol. Fertility Soils* 44: 557-569.
- Norma Oficial Mexicana 021. NOM-021-RECNAT 2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Diario oficial 2ª Sección. 31 de diciembre del 2002.
- Paterson, E., B. A. Goodman, and V. C. Farmer. 1991. The chemistry of aluminum, iron, and manganese oxides in acid soils. *In*: Ulrich, B., and M. E. Sumner (eds). *Soil Acidity*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, Germany. pp: 97-124.
- Purakayastha, T. J., D. R. Huggins, and J. L. Smith, 2008. Carbon sequestration in native prairie, perennial grass, no-till, and cultivated palouse silt loam. *Soil Sci. Soc. Agron. J.* 72: 534-540.
- Richardson, D.M. (ed) 2005. *Ecology and Biogeography of Pinus*. Cambridge University Press. 1998. United Kingdom. 535 p.
- Sánchez G., A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de pinos en México. *Maderas y Bosques* 14: 107-120.
- USDA-NRCS. United States Department Agriculture, National Research Conservation Soil. 2004. *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 4.0. USDA-NRCS, Lincoln, Nebraska. 735 p.
- White, A. F., T. Bullen D., D. Vivit V., M. Schulz S., and D. Clow W. 1999. The role of disseminated calcite in the chemical weathering of granitoid rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63: 1939-1953.