

VARIACIÓN EN ALMACENES DE CARBONO EN SUELOS DE UNA TOPOSECUENCIA

VARIATION IN SOIL CARBON STOCKS IN A TOPOSEQUENCE

Virginia Avilés-Hernández^{1*}, Alejandro Velázquez-Martínez¹, Gregorio Angeles-Pérez¹, Jorge Etchevers-Barra²,
Héctor De los Santos-Posadas¹, Tangaxuhan Llanderal¹

¹Forestal, ²Edafología, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco. Km. 36.5. Montecillo, Estado de México (vavilesh@colpos.mx) (alejvela@colpos.mx)

RESUMEN

La información sobre la variación en reservas de carbono (C) respecto a la topografía del suelo es escasa. Para determinar la variación del C edáfico, se estimaron los almacenes de C en el subsuelo de una toposecuencia (cresta, ladera, valle y planicie), de un bosque de *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*. Se establecieron tres parcelas de observación, de 400 m² cada una en cada posición topográfica, y se seleccionaron dos sitios dentro de cada parcela para medir el C almacenado en el subsuelo (suelo y raíces) de 0 a 15, 15 a 30 y 30 a 45 cm. Se encontró una variación en el C almacenado en el suelo; gradual creciente desde la cresta a la planicie, así como valores decrecientes al aumentar la profundidad. La mayor reserva de C total se encontró en la planicie (208 t C ha⁻¹) y la menor en la cresta (159 t C ha⁻¹). Asimismo, el mayor almacén de C se encontró en los primeros 15 cm de profundidad, con 85 t C ha⁻¹ en promedio. Las diferencias encontradas en las reservas de C en las diferentes condiciones topográficas podrían deberse al diferencial en la velocidad de descomposición de la materia orgánica de las especies dominantes en cada condición, indicando que las reservas de C cambian en función de la topografía, y con ello la disponibilidad de recursos en el sistema.

Palabras clave: *Fagus grandifolia*, bosque mesófilo, captura de carbono, productividad forestal, servicios ambientales.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha puesto especial énfasis en el suelo como reservorio de C a escala global, por la importancia que tiene para evaluar los cambios en las concentraciones de C atmosférico (Schlesinger, 1991; Batjes, 1996; Johnson *et al.*, 2002). El C es un elemento clave en el desarrollo del componente orgánico del suelo y en la estructura y función de los ecosistemas, debido a que no sólo determina los cambios en su almacenamiento si no también controla su productividad (Janish y Harmon, 2002; Law *et al.*, 2003).

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Abril, 2008. Aprobado: Mayo, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 457-464. 2009.

ABSTRACT

Information on the variation of carbon (C) stocks relative to soil topography is scarce. To determine the soil C variation, C stocks in the subsoil of a toposequence (hilltop, hillside, valley and plains) in a *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana* forest were estimated. Three 400 m² observation plots were set up in each topographic position, and two sites within each plot were selected to measure the C stored in the subsoil (soil and roots) at depth intervals of 0 to 15, 15 to 30 and 30 to 45 cm. Variation in soil C stores was found in an increasing gradient from hilltop to plains, as well as decreasing values with increasing depth. The largest total C stock was found on the plains (208 t C ha⁻¹) and the lowest on the hilltop (159 t C ha⁻¹). The differences in C stocks found in different topographic conditions could be due to the differential speed of decomposition of organic matter of the dominant species in each condition, indicating that C stores change in function of the topography together with availability of resources in the system.

Key words: *Fagus grandifolia*, mesophyll forest, carbon sequestration, forest productivity, environmental services.

INTRODUCTION

In recent years, special emphasis has been placed on the soil as a C reservoir at a world scale because of its importance in evaluating the changes in atmospheric C concentrations (Schlesinger, 1991; Batjes, 1996; Johnson *et al.*, 2002). C is a key element in the development of the organic component of the soil and in the structure and functioning of the ecosystems, which not only determine changes in C stocks, but also controls productivity (Janish and Harmon 2002; Law *et al.*, 2003).

The soil organic carbon (SOC) content can be two or three times the C deposits of the aerial biomass (Schlesinger, 1991; Eswaran *et al.*, 1993; Etchevers *et al.*, 2001), while the total soil C stock account for 75 % of the C stored in terrestrial ecosystems (Post *et al.*, 1990; Acosta *et al.*, 2001; Lal, 2007). Accumulated C of humified organic material in the soil accounts for around 58 % (Etchevers *et al.*, 2001).

El contenido de carbono orgánico (CO) en el suelo llega a superar en dos ó tres veces los depósitos de C de la biomasa aérea (Schlesinger, 1991; Eswaran *et al.*, 1993; Etchevers *et al.*, 2001), mientras que las reservas de C total en el suelo representan 75 % del C almacenado en los ecosistemas terrestres (Post *et al.*, 1990; Acosta *et al.*, 2001; Lal, 2007). La acumulación de C en la materia orgánica humificada del suelo constituye alrededor de 58 % (Etchevers *et al.*, 2001).

El CO controla el ciclo de nutrimentos y la productividad del suelo (Van Cleve y Powers, 1995), mientras que la vegetación es el medio por el que se produce el flujo del C entre la atmósfera y el suelo. La parte activa del suelo está representada por la materia orgánica y ésta cambia con la profundidad, la textura del suelo y su composición química (Post *et al.*, 1990).

Diversos estudios han mostrado diferencias en la concentración de nutrimentos en suelo, con un patrón de comportamiento a lo largo de gradientes, de sitios donantes a sitios receptores o de depositación (Liechty *et al.*, 1997; Hirobe *et al.*, 1998; Campo, 2003). Livingston *et al.* (1988) mencionan que existen variaciones en la concentración de nutrimentos conforme cambia la topografía del suelo en los bosques del Amazonas en Brasil. Por tanto, las reservas de C, al igual que las concentraciones de nutrimentos, pueden presentar variaciones entre diferentes condiciones topográficas.

De probarse lo anterior se tendrían más elementos para entender los patrones de distribución del CO en las capas superficiales y subsuperficiales del suelo en ecosistemas naturales y su modificación por la influencia de la topografía. El objetivo de esta investigación fue evaluar las diferencias en reservas de carbono en el suelo a lo largo de un gradiente topográfico, y la relación que existe con la profundidad del suelo en un bosque de *Fagus*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el ejido La Mojonera, Municipio de Zacualtipán, Hidalgo, México. La altitud varía de 1900 a 2200 m. La temperatura media anual es de 14 °C y la precipitación anual de 2047 mm. El clima es C(fm) templado sub-húmedo con lluvias la mayor parte del año (García, 2004). Ladera de sierra compleja y relieve muy escarpado. Material litológico de origen volcánico y alto contenido de materiales amorfos. Roca ígnea extrusiva, frecuente afloramiento de obsidiana y ceniza volcánica consolidada con vetas de cuarzo. El suelo predominante es Andosol vítrico, según clasificación de la FAO en 1998. Se caracteriza por ser profundo, con buen drenaje, estructura granular media (bien desarrollada),

SOC controls the nutrient and productive cycle of the soil (Van Cleve and Powers, 1995), while vegetation is the means through which C flows between the atmosphere and the soil. The active part of the soil is represented by organic matter, which changes with soil depth, texture and chemical composition (Post *et al.*, 1990).

Several studies have shown differences in soil nutrient concentration which exhibits a pattern along gradients, from source sites to sink sites (Liechty *et al.*, 1997; Hirobe *et al.*, 1998; Campo, 2003). Livingston *et al.* (1988) mention that nutrient concentration varies depending on soil topography changes in the forests of the Amazon in Brazil. Therefore, C reserves, like nutrient concentrations, can vary among different topographic conditions.

If this is proved, more elements would be added to the understanding of SOC distribution in the topsoil and subsoil of natural ecosystems as influenced by topography. The objective of this study was to assess the differences in soil carbon stocks along a topographic gradient and their relationship to soil depth in a *Fagus* forest.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was conducted in the ejido La Mojonera, Municipality of Zacualtipán, Hidalgo, México. Altitude varies between 1900 and 2200 m. Mean annual temperature is 14 °C and yearly rainfall is 2047 mm. Climate is temperate subhumid C(fm) with rain during most of the year (García, 2004). Mountain slopes are complex and steep. Lithologic material is of volcanic origin with a high content of amorphous material, extrusive igneous rocks, frequent outcropping of obsidian and consolidated volcanic ash with veins of quartz. The predominant soil is Vitric andosol, according to the 1998 FAO classification. It is a deep soil with good drainage, medium granular structure (well-developed), medium texture, and high content of organic matter (FAO-ISRIC-SICS, 1998).

In the northeastern part of La Mojonera is found the forest in which *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana* is dominant, covering an area of 45 ha. Lesser tree species such as *Magnolia schiedeana*, *Clethra macrophylla* and several species of the genus *Quercus* (Pérez, 1999) are found in association. Of the different *Fagus* population that exist in México, this is the largest and best preserved (Hernández *et al.*, 1951; Peters, 1995; Williams *et al.*, 2003).

Selection of sites

For measurement of soil carbon, four conditions were selected along a topographic gradient: hilltop, hillside, valley and plains, following the physiographic characterization proposed by Ortiz

texturas medias, y alto contenido de materia orgánica (FAO-ISRIC-SICS, 1998).

En la parte nororiental de La Mojonera se encuentra el bosque dominado por *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana* con una superficie de 45 ha. Se asocian en menor grado especies arbóreas como *Magnolia schiedeana*, *Clethra macrophylla* y varias especies del género *Quercus* (Pérez, 1999). Entre las diferentes poblaciones de *Fagus* que existen en México, ésta es la mejor conservada y de mayor superficie (Hernández *et al.*, 1951; Peters, 1995; Williams *et al.*, 2003).

Selección de sitios

Para la medición de carbono en el suelo se seleccionaron cuatro condiciones de acuerdo al gradiente topográfico: cresta, ladera, valle y planicie, considerando la caracterización fisiográfica propuesta por Ortíz y Cuanalo (1978). El tipo de suelo en las cuatro condiciones de la toposecuencia es Andosol vítrico (FAO-ISRIC-SICS, 1998).

La cresta fue la condición más elevada del área de estudio, con pendiente promedio de 60 %, 1960 m de altura y suelo con profundidad promedio de 0.80 m. La ladera es una unidad terrestre con pendiente de 85 %, entre 1900 y 1930 m y profundidad promedio del suelo de 0.56 m. El valle presentó una pendiente de 35 % en promedio, entre 1820 y 1840 m, con profundidad promedio del suelo de 0.90 m. La planicie presentó pendiente menor de 10 %, altitud de 1860 m y profundidad promedio del suelo de 0.95 m. En cada condición se establecieron tres parcelas de observación con una superficie de 400 m² (20×20 m).

Determinación del C en la parte subterránea

Para medir el C almacenado en el suelo mineral y en las raíces finas, se definieron dos puntos de muestreo al azar en cada parcela, y se obtuvieron muestras de suelo a tres profundidades: 0-15, 15-30 y 30-45 cm.

El suelo se muestreó de acuerdo con la metodología propuesta por Monreal *et al.* (2005). Para cada sitio de muestreo se estableció un diseño que permitió determinar con la misma muestra el C almacenado en el suelo, la densidad aparente, la biomasa y el C en raíces por cada intervalo de profundidad. Este sistema es similar a un reloj, con un círculo de 0.5 m de diámetro. Dentro de cada parcela se colocaron dos relojes. En cada uno se muestrearon dos puntos, a las 6 y a las 12 h.

Las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio, donde se secaron al aire libre, y se separaron manualmente las raíces finas visibles, las piedras, las gravas y los residuos vegetales y animales no descompuestos. El suelo mineral se secó a 105 °C hasta peso constante con el propósito de calcular la masa efectiva de suelo en el volumen recolectado.

Determinación de C en raíces

Para determinar la biomasa de raíces, se secaron éstas a 78 °C por 24 h en una estufa de circulación forzada. Para el análisis de C,

and Cuanalo (1978). The soil type in the four conditions of the toposequence is Vitric andosol (FAO-ISRIC-SICS, 1998).

Hilltop was the highest area of study at an elevation of 1960 m, with a 60% slope and soil with an average depth of 0.56 m. The valley had an average slope of 35 %, elevation between 1820 and 1840 m, and average soil depth of 0.90 m. The plains had a slope of less than 10 %, altitude of 1860 m and average soil depth of 0.95 m. In each condition, three observation plots were established, each with an area of 400 m² (20×20 m).

Determination of C in the belowground component

Two sampling points were randomly allocated in each plot in order to measure the C stored in the mineral soil and fine roots. Samples were obtained at three depths: 0-15, 15-30, and 30-45 cm.

Soil was sampled following the method proposed by Monreal *et al.* (2005). For each sampling site, a design was set up to allow determination of soil C, bulk density, biomass and C in roots at each depth interval using the same soil sample. This system is clock-like, with a circle 0.5 m in diameter. Two clocks were placed inside each plot, and two points, at 6 and 12 o'clock, were sampled.

The soil samples were taken to the laboratory where they were air-dried and visible fine roots, stones, gravels, and non-decomposed plant and animal residues were removed manually. The mineral soil was dried at 105 °C until weight was constant, with the objective of calculating the effective mass of soil in the sample volume.

Determination of C in roots

Roots were dried at 78 °C for 24 h in a forced-air oven and then root biomass was determined. For the analysis of C, one compound sample was made per condition and later milled in two types of mills. The finest roots were ground in a General Electric Mod. 5KH39QN5525 mill, while the thickest roots were ground in a THOMAS WILEY MILL, Model ED-5. To determine total C in roots, a Shimadzu TOC 5000-A automatic C analyzer was used.

Determination of C in the soil

To determine organic C in mineral soil, soil samples were ground and sifted in a 2 mm mesh. Once homogenized, a 5 g sub-sample was dried at 105 °C and ground in a SPECK 8000 MIXER/MILL until the material passed through a mesh of 100 screens. Total C was determined in an automatic analyzer (Shimadzu TOC 5000-A).

Calculation of soil C requires precise measurement of soil bulk density. In the laboratory the volume of soil sampled was corrected by subtracting the volume occupied by stones and roots and calculating their densities. With the density of these materials, their volume was estimated and subtracted from that of the soil sample to determine bulk density.

se hizo una muestra compuesta por condición. Posteriormente, se molieron en dos tipos de molinos; las raíces mas finas en un General Electric Mod. 5KH39QN5525 y las más gruesas en un THOMAS WILEY MILL Modelo ED-5. Para determinar el C total en raíces se utilizó un analizador automático ShimadzuTOC 5000-A.

Determinación de C en suelo

Para determinar el C orgánico en suelo mineral, se molió y tamizó el suelo en una malla de 2 mm. Una vez homogenizadas, se tomó una submuestra de 5 g, se secó a 105 °C y se molió en un molino tipo SPECK 8000 MIXER/MILL hasta que el material pasó por un tamiz de 100 mesh. La determinación se realizó en un analizador automático de C total (ShimadzuTOC 5000-A).

El cálculo del C almacenado en el suelo requiere de la medición precisa de la densidad aparente del suelo. En el laboratorio el volumen de suelo muestreado se corrigió restando el volumen ocupado por piedras y raíces, calculando en primera instancia sus densidades. Con la densidad de estos materiales se estimó el volumen, el cual se restó a la muestra de suelo para determinar la densidad aparente.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el uso del paquete SAS V8 (2000). Se realizó un ANOVA para un diseño completamente al azar. Dado que esencialmente se trata del mismo tipo de suelo con características similares en el perfil de las cuatro condiciones topográficas, se supuso una diferencia constante por profundidad de muestreo. Las variables fueron: contenido de C en suelo (t C ha^{-1}), C en raíces (t C ha^{-1}), y C total (t C ha^{-1}), correlacionando cada una con cada condición topográfica. Se realizó una prueba de normalidad de los datos para verificar los supuestos del modelo. Cuando se detectaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en el análisis de varianza se procedió a la comparación de medias con una prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Reservas de C total en la toposecuencia

Los resultados obtenidos indican que existen diferencias significativas en el C almacenado en el suelo mineral y C total, en las diferentes condiciones topográficas ($p \leq 0.001$ y $p \leq 0.05$, respectivamente), pero no para el C en raíces (Cuadro 1). La mayor reserva de C se encuentra en la planicie con 208 t C ha^{-1} y la menor en la cresta, con una reserva de C almacenado de 159 t C ha^{-1} (Cuadro 2, Figura 1). La reserva de carbono en la planicie es 36, 34 y 17 % superior a las de cresta, ladera y valle.

El porcentaje de C en el suelo no mostró una variación aparente entre una y otra condición topográfica, presentándose valores de 11.8, 8.38, 9.4 y

Statistical analysis

Statistical analysis of the data was performed using SAS V8 (2000) software. An ANOVA was done for a completely random design. Given that essentially the same soil with similar profile characteristics was being dealt with, in the four topographic conditions a constant difference was assumed between sampling depths. The variables were soil C content (t C ha^{-1}), C in roots (t C ha^{-1}), and total C (t C ha^{-1}); each was correlated with each topographic condition.

A test of data normality was done to verify the model assumptions. When statistical differences ($p \leq 0.05$) were detected in the analysis of variance, means were compared with the Tukey test.

RESULTS AND DISCUSSION

Total C stocks in the toposequence

The results obtained indicate that there are significant differences in C stored in mineral soil and total C among the different topographic conditions ($p \leq 0.001$ and $p \leq 0.05$, respectively), but no differences were found for roots (Table 1). The largest C stocks are found on the plains with 208 t C ha^{-1} and the smallest on the hilltop, with a C stock of 159 t C ha^{-1} (Table 2, Figure 1). The carbon stocks in the plains are 36, 34, and 17 % higher than those in the hilltop, hillside and valley soils.

The percentage of soil C did not exhibit any apparent variation among topographic conditions, having values of 11.8, 8.38, 9.4 and 11.67 % for the hilltop, hillside, valley and plains. Thus, it can be inferred that topography does influence movement of water, soluble salts, and colloidal minerals, and accumulation of organic matter (OM). In this study, high contents of OM were found in the first 15 cm of soil (24.1 %).

Some reports point out that topography influences C, N, and OM stores, indicating that soil processes and characteristics differ with small changes in the micro-topography, which determine changes in the forest floor and mineral soil (Lajtha and Schlesinger, 1988; Liechty *et al.*, 1997). Nutrient availability changes with the slope (Hirobe *et al.*, 1998; Campo, 2003) since source sites are in the higher parts and sink parts are in the lower parts. Likewise, biological activity decreases when slope of the terrain increases (Raghubanshi, 1992).

From the soil C results in this ecosystem, it can be assumed that carbon stocks are also related to plant cover and chemical composition of the vegetation present in each topographic condition. The dominant vegetation in three of the conditions (hillside, valley, and plain) is *Fagus*, with a basal area of 35, 47 and $38 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, while the hilltop is dominated by *Quercus* spp., with a basal area of $31 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$.

Cuadro 1. Cuadrados medios y significancia estadística del análisis de varianza de la variable carbono en suelo, en raíces y total en la toposecuencia.**Table 1. Mean squares and statistical significance of the analysis of variance of the variable soil carbon in roots and total C in the toposequence.**

Variable	Cuadrados medios	
	Condición topográfica	Profundidad del suelo
Carbono en suelo	549.83 (0.0017) [†]	3821.66 (<0.0001) [†]
Carbono en raíces	7.13 (0.52) ^{ns}	185.90 (<0.0001) [†]
Carbono total	505.05 (0.0101) [‡]	5698.67 (<0.0001) [†]

[†]Altamente significativo con ($p \leq 0.01$); [‡]Significativo con ($p \leq 0.05$);

^{ns}No significativo.

11.67 % para la cresta, ladera, valle y planicie. Por lo anterior, se puede inferir que la topografía sí influye en el movimiento del agua, las sales solubles, los minerales coloidales y la acumulación de materia orgánica (MO). En este estudio, el suelo presentó alto contenido de MO en los primeros 15 cm de profundidad (24.1 %).

Algunos reportes señalan que la topografía influye en los almacenes de C, N y MO, indicando que los procesos y características del suelo son diferentes con pequeños cambios en la microtopografía y determinan cambios en el piso forestal y en el suelo mineral

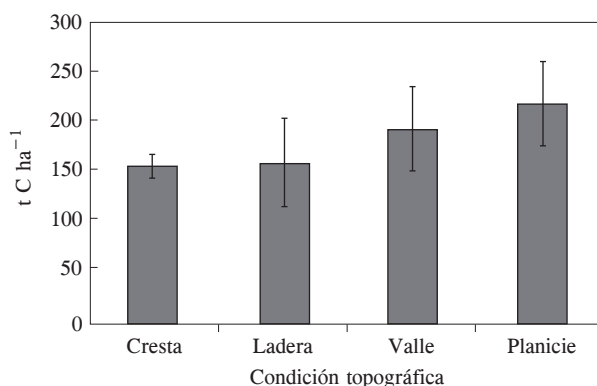


Figura 1. Reservas de C total en suelo de la toposecuencia.
Figure 1. Total C reserves in the soil of a toposequence.

The differences found in the C stocks of the different topographic conditions could be due to differential speed of decomposition of the organic matter of the dominant species of each condition. This indicates that the C stocks change in function of the topography and, with it, the availability of the system's resources.

Vertical distribution of soil C stores

There were highly significant differences ($p \leq 0.01$) among sampled depths in C in mineral soil, C in roots, and total C (Table 1). The highest content of soil C is found in the first 15 cm of soil and decreases with depth (Table 3). This pattern was observed in the four

Cuadro 2. Carbono almacenado en suelo mineral y raíces a tres profundidades en la toposecuencia. Valores entre paréntesis son desviaciones estándar.**Table 2. Carbon stored in the mineral soil and roots at three depths in the toposequence. Values in parentheses are standard deviations.**

Condición topográfica	Profundidad cm	Carbono en el suelo (t C ha ⁻¹)		Carbono en raíces (t C ha ⁻¹)		Carbono total (t C ha ⁻¹)	
Cresta	0 - 15	66.32	(5.78)	9.7	(3.47)	76.09	(8.57)
	15 - 30	40.15	(6.94)	4.12	(3.75)	44.27	(10.42)
	30 - 45	36.17	(10.99)	1.86	(0.71)	38.46	(12.05)
	Total	142.64	(16.38)	15.68	(4.04)	158.82	(20.26)
Ladera	0 - 15	72.16	(10.05)	6.86	(1.49)	79.02	(11.48)
	15 - 30	43.72	(10.79)	1.55	(1.21)	45.27	(11.99)
	30 - 45	38.11	(14.07)	0.95	(0.60)	39.06	(14.66)
	Total	153.99	(18.26)	9.36	(3.25)	163.35	(21.50)
Valle	0 - 15	79.71	(7.51)	9.78	(9.78)	89.49	(16.01)
	15 - 30	49.92	(8.75)	1.65	(1.13)	51.53	(7.69)
	30 - 45	43.65	(14.93)	0.92	(0.45)	44.63	(15.43)
	Total	173.28	(19.27)	12.35	(4.92)	185.65	(24.16)
Planicie	0 - 15	85.24	(5.08)	7.88	(1.08)	93.47	(3.85)
	15 - 30	58.65	(9.99)	1.59	(1.49)	60.29	(8.62)
	30 - 45	52.24	(13.16)	1.62	(1.03)	53.87	(14.10)
	Total	196.13	(17.50)	11.09	(3.62)	207.63	(21.25)

(Lajtha y Schlesinger, 1988; Liechty *et al.*, 1997). La disponibilidad de nutrientes cambia con la pendiente (Hirobe *et al.*, 1998; Campo, 2003) al establecerse sitios donadores en la parte alta y sitios receptores en la parte baja. Asimismo, la actividad biológica disminuye conforme aumenta la pendiente en el terreno (Raghubanshi, 1992).

De acuerdo con los resultados de C en suelo en este ecosistema, se puede suponer que las reservas de carbono también están relacionadas con la cobertura y composición química de la vegetación presente en cada condición topográfica. La vegetación dominante en tres condiciones (ladera, valle y planicie) es *Fagus*, con área basal de 35, 47 y 38 m² ha⁻¹, mientras que la cresta está dominada por *Quercus* spp., con área basal de 31 m² ha⁻¹.

Las diferencias encontradas en las reservas de C en las diferentes condiciones topográficas podrían deberse al diferencial en la velocidad de descomposición de la materia orgánica de las especies dominantes en cada condición. Esto indica que las reservas de C cambian en función de la topografía, y con ello la disponibilidad de recursos en el sistema.

Distribución vertical del C almacenado en el suelo

Existen diferencias altamente significativas en el C en suelo mineral, C en raíces y C total entre las profundidades muestreadas ($p \leq 0.01$) (Cuadro 1). El mayor contenido de C en el suelo se encuentra dentro de los primeros 15 cm de profundidad y disminuye conforme aumenta la profundidad (Cuadro 3). Este patrón se observó en las cuatro condiciones topográficas. La mayor reserva de C en los primeros 15 cm se registró en la planicie con 93 t C ha⁻¹ y la menor en cresta con 76 t C ha⁻¹ (Cuadro 2, Figura 2).

En relación al contenido de MO se observan valores promedio de 24.1, 11.4 y 8.5 % para las profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm. Con la profundidad disminuye el contenido de MO; así, en los horizontes inferiores el contenido llega a ser tres veces menor que en los primeros 15 cm. En la ladera el contenido de MO en los primeros 15 cm (25.9 %) es cuatro veces mayor a la de profundidades inferiores (6 %).

Lo anterior fue similar al comportamiento del C almacenado, debido a que en la cresta, ladera, el valle y la planicie se registró una reserva de C de 159, 163, 186 y 208 t C ha⁻¹ (Cuadro 2).

Aun cuando en este estudio no se consideró la actividad microbiana en el proceso de descomposición de la MO, existen reportes de que en las capas superficiales del suelo las condiciones que favorecen la actividad microbiana, como temperatura y humedad, son más propicias (Van Cleve and Powers, 1995).

topographic conditions. The largest C store in the first 15 cm was found in the plains soil with 93 t C ha⁻¹, and the smallest in the hilltop soil, 76 t C ha⁻¹ (Table 2, Figure 2).

Average OM content values of 24.1, 11.4 and 8.5 % were observed in the depth intervals of 0-15, 15-30 and 30-45 cm. OM content decreases with depth; thus, in the lower horizons OM content is up to three times lower than that in the first 15 cm. On the hillside the OM content in the first 15 cm (25.9 %) is four times higher than at lower depths (6 %).

This was similar to the behavior of stored C, since on the hilltop, hillside, valley and plains C stores of 159, 163, 186 and 208 t C ha⁻¹ were recorded (Table 2).

Although it was not considered in our study, the upper layers of soil are reported to have the most favorable conditions for microbial activity in the process of OM decomposition, such as temperature and moisture (Van Cleve and Powers, 1995).

There were significant differences ($p \leq 0.001$) among different soil sample depths in root C content, which was highest in the 0-15 cm depth interval. However, C in roots of the 15-30 and 30-45 cm depths were not statistically different (Table 3).

Roots of most herbaceous and woody species are found in the upper soil levels (Kimmins, 2004). In our study it was observed that as depth increased, the quantity of biomass of fine roots was 4 to 6 times less than that of the first layer. Similar results were found by Acosta *et al.* (2002), who reported 4.7, 1.2 and 0.5 t C ha⁻¹ of root biomass in a *Liquidambar* forest at depths of 0-15, 15-30 and 30-45 cm.

Distribution of total C at different soil depths in the toposequence showed behavior similar to an inverted J-shaped curve, in which the highest C stock was found in the first 15 cm, decreasing with depth (Figure 2). In all four topographic conditions, the C stored in the

Cuadro 3. Comparación de medias entre reservas de la variable carbono en suelo, raíces y total, a tres diferentes profundidades del suelo de una toposequencia.

Table 3. Comparison of means of the variables soil carbon, carbon in roots, and total carbon at three different soil depths of a toposequence.

Profundidad del suelo	Carbono en suelo t C ha ⁻¹	Carbono en raíces t C ha ⁻¹	Carbono total t C ha ⁻¹
0 - 15	75.86 a	8.56 a	84.52 a
15 - 30	48.11 b	2.23 b	50.34 b
30 - 45	42.54 b	1.34 b	44.01 b

Valores de medias seguidas de la misma letra en la misma columna no son estadísticamente diferentes.

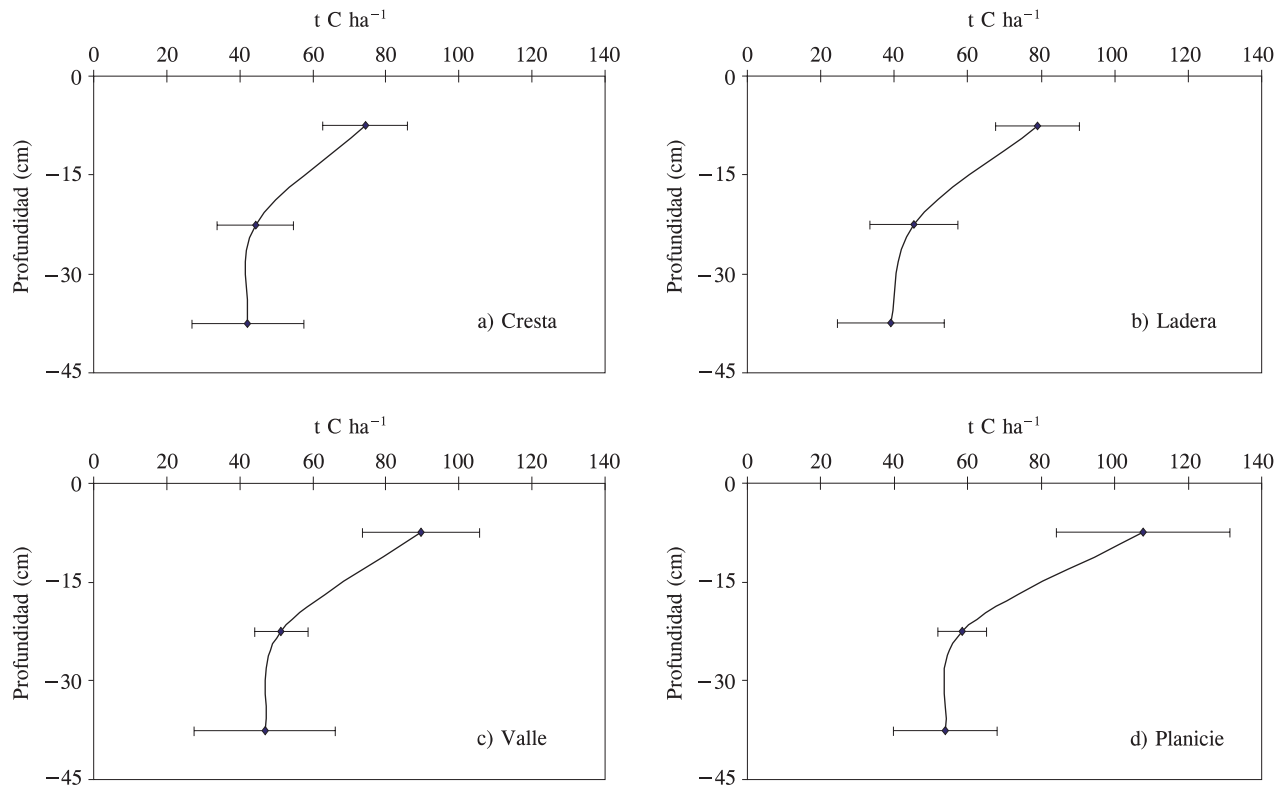


Figura 2. Distribución vertical de C total (t C ha^{-1}) en el suelo de una toposequencia. Las líneas horizontales representan la desviación estándar.

Figure 2. Vertical distribution of total C (t C ha^{-1}) in the soil of a toposequence. Horizontal lines represent the standard deviation.

Hubo diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.001$) entre las diferentes profundidades de suelo muestreadas en el contenido de C en raíces, el cual fue mayor en la profundidad 0-15 cm. Sin embargo, el C en raíces en las capas 15-30 y 30-45 cm de profundidad no mostró diferencia estadística (Cuadro 3).

Las raíces de la mayoría de especies herbáceas y leñosas se encuentran en horizontes superficiales del suelo (Kimmins, 2004). En este estudio se observó que conforme se incrementa la profundidad, la cantidad de biomasa de las raíces finas disminuye de 4 a 6 veces respecto a la primera capa. Resultados similares fueron encontrados por Acosta *et al.* (2002), quienes reportaron para un bosque de *Liquidambar*, 4.7, 1.2 y 0.5 t C ha^{-1} en biomasa de raíces para profundidades de suelo de 0-15, 15-30 y de 30-45 cm.

La distribución del C total a diferentes profundidades del suelo en la toposequencia mostró un comportamiento parecido a una curva en forma de J-invertida, donde la más alta reserva de C se encuentra en los primeros 15 cm disminuyendo con la profundidad (Figura 2). En las cuatro condiciones topográficas el C almacenado en la primera capa del suelo (0-15 cm) fue casi el doble del encontrado a

first soil layer (0-15 cm) was almost double that found at 15-30 cm (Table 3). Nevertheless, the decrease in C stored in the soil as depth increased was consistent in the four conditions.

The results suggest that the underground components (roots and soil) of the ecosystem studied are an important reservoir, in particular for atmospheric C fixation. They are also an important sink of C in the *Fagus* forest studied.

CONCLUSIONS

Statistical differences in soil carbon stocks were found along the topographic gradient. The highest content of total C (fine roots and soil) was observed on the plains with 208 t C ha^{-1} , and the lowest was on the hilltop with 159 t C ha^{-1} . Considering the top 45 cm of the mineral soil, the largest reserve of C stocks was found in the 0-15 cm layer. C in fine roots was less than 10 % that of the mineral soil.

—End of the English version—



15-30 cm de profundidad (Cuadro 3). No obstante, la disminución del C almacenado en el suelo conforme aumentó la profundidad fue consistente en las cuatro condiciones.

Los resultados presentados sugieren que el C almacenado en los componentes subterráneos (raíces y suelo) del ecosistema estudiado, son un reservorio importante, principalmente para la fijación de C atmosférico. Además, representan un importante sumidero de C en el bosque de *Fagus* estudiado.

CONCLUSIONES

Se encontraron diferencias estadísticas en las reservas de C edáfico a lo largo del gradiente topográfico. El mayor contenido de C total (raíces finas y suelo) se observó en la planicie con 208 t C ha⁻¹ y el menor en la cresta con 159 t C ha⁻¹. Considerando los 45 cm superficiales de suelo mineral, la mayor reserva de C almacenado se encuentra en la profundidad 0-15 cm. El C en raíces finas, comparado con la reserva en suelo mineral, fue menor a 10 %.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Fondo Sectorial CONAFOR-CONACYT a través del proyecto 10825. El Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados otorgó apoyo adicional.

LITERATURA CITADA

- Acosta M., M., J. D. Etchevers B., K. Quednow y C. Monreal. 2001. Un método para la medición de captura de carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. *In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 11 p.
- Acosta M., M., J. J. Vargas H., A. Velázquez M., y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Batjes, N. H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Campo A., J. 2003. Disponibilidad y flujos de nutrimentos en una toposecuencia con bosque tropical seco en México. *Agrociencia* 37: 211-219.
- Eswaran, H., E. V. Den Berg, and P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 192-194.
- Etchevers B., J. D., M. Acosta M., C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimientos de la parte subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. *In: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18 al 20 de Octubre de 2001. Valdivia, Chile. 19 p.
- FAO-ISRIC-SICS. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84. FAO, Rome. pp: 46-70.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen. IG, UNAM. Serie Libros No. 6. Quinta Edición. pp: 34-35.
- Hernández X., E., H. Crum, W. B. Fox and A. Sharp. 1951. A unique vegetational area in Tamaulipas. *Bull. Torrey Bot. Club* 78: 458-463.
- Hirobe, M., N. Tokuchi, and G. Iwatsubo. 1998. Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *Eur. J. Soil Biol.* 34(3): 123-131.
- Janish, J. E., and M. E. Harmon. 2002. Successional changes in live and dead wood carbon stores: implications for ecosystem productivity. *Tree Physiology* 22: 77-89.
- Johnson, D. W., J. D. Knoepp, W. T. Swank, J. Shan, L. A. Morris, D. H. Van Lear, and P. R. Kapeluck. 2002. Effects of forest management on soil carbon: results of some long-term resampling studies. *Environ. Pollut.* 116: 201-208.
- Kimmins, J. P. 2004. Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry. Prentice Hall. New Jersey. 611 p.
- Lajtha, K., and W. H. Schlesinger. 1988. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. *Ecology* 69: 24-39.
- Lal, R. 2007. World soils and global issues. *Soils Tillage Res.* 97: 1-4.
- Law, B. E., O. J. Sun, J. Campbell, S. Van Tuyl, and P. E. Thornton. 2003. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biol.* 9: 510-524.
- Liechty, O. H., F. M. Jurgensen, D. G. Mroz, and R. M. Gale. 1997. Pit and mound topography and its influence on storage of carbon, nitrogen and organic matter within an old-growth forest. *Can. J. For. Res.* 27: 1992-1997.
- Livingston G., P. M. Vitousek, and P. A. Matson. 1988. Nitrous oxide fluxes and nitrogen transformations across a landscape gradient in Amazonia. *J. Geophys. Res.* 93: 1593-1599.
- Monreal, C. M., J. D. Etchevers B., M. Acosta M., C. Hidalgo M., J. Padilla C., R. M. López, L. Jiménez S., y A. Velázquez M. 2005. A method for measuring above-and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Can. J. Soil Sci.* 85: 523-530.
- Ortiz S., C. A., y H. Cuanalo De la C. 1978. Metodología del levantamiento fisiográfico, un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. Rama de Suelos. Chapingo, México. pp: 24-78.
- Pérez R., P. M. 1999. Las hayas de México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 51 p.
- Peters, R. 1995. Architecture and development of Mexican beech forest. *In: E. O. Box, R. K. Peet, T. Masuzawa, I. Yamada, K. Fujiwara, y P. F. Maycock (eds). Vegetation Science in Forestry*. Kluwer Academic Pub. Netherlands. pp: 325-343.
- Post, W. M., T. H. Peng, W. R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale and D. L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. *Am. Scientist* 78: 310-326.
- Raghubanshi, A. S. 1992. Effect of topography on selected soil properties and nitrogen mineralization in a dry tropical forest. *Soil Biol. Biochem.* 24(2): 145-150.
- SAS. 2000. User's Guide: Statistics. Version 8. Edition. Statistical Analysis System Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Schlesinger, W. 1991. Biogeochemistry. An analysis of global change. Academic Press Inc. San Diego, Cal. USA. 588 p.
- Van Cleve, K., and R. F. Powers. 1995. Soil carbon, soil formation and ecosystem development. *In: Mc Free, W. W., and J. M. Kelly (eds). Carbon forms and functions in forest soils*. Soil Sci. Soc. Am. USA. pp: 155-199.
- Williams L. G., A. Rowden, and A. C. Newton. 2003. Distribution and stand characteristics of relict populations of Mexican beech (*Fagus grandifolia* var. *mexicana*). *Biol. Conserv.* 109: 27-36.