

Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México

Organic carbon concentrations in the woodland and soils of the protected natural area “El Faro” in Tlalmanalco, Estado de Mexico

Oscar Cano-Flores^{1†} , Gilberto Vela-Correa² ,
Otilio A. Acevedo-Sandoval³  y Miguel Ángel Valera-Pérez⁴ 

¹ Alumno de la Maestría en Ciencias Agropecuarias. Departamento Producción Agrícola y Animal; ² Departamento de El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud. 04960 Coyoacán, Ciudad de México, México.

[†] Autor para correspondencia (ros72_007@hotmail.com)

³ Área Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carretera Pachuca-Tulancingo km 5, 11 de Julio 2da Secc. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

⁴ Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. 14 Sur 6301, Edificio IC4, Cd. Universitaria. 72592 Puebla, Puebla, México.

RESUMEN

A pesar de algunos esfuerzos de reforestación, México pierde alrededor de 500 000 ha de bosques templados anualmente, lo cual libera a la atmósfera el carbono contenido en el tejido vegetal, mantillo y suelos. Gran parte de estos bosques se encuentran en suelos de origen volcánico que ocupan el 1.2% del territorio nacional, pero existe poca información acerca del almacenamiento de carbono en suelos, mantillo y vegetación arbórea sobre estos suelos. Por esto, el objetivo de esta investigación fue determinar las concentraciones de carbono orgánico en el arbolado, mantillo y suelos en el área natural protegida (ANP) El Faro en Tlalmanalco, Edo. de México. Se seleccionaron ocho sitios de muestreo bajo cuatro categorías de cobertura arbórea: *Cupressus-Pinus*, *Pinus-Quercus*, *Quercus-Pinus* y *Quercus*. Se determinó la especie y el diámetro normal (DN) de los árboles mayores a 10 cm de DN, se colectaron muestras de mantillo y de suelo de 0 a 20 cm de profundidad. En laboratorio, se determinaron las concentraciones de carbono orgánico del suelo (COS), densidad aparente, porosidad, y volumen de rocas. Se estimó el carbono total en arboles por especie con base en fórmulas alométricas. Se almacena en promedio 185.34 Mg ha⁻¹ en total: 56.40 Mg ha⁻¹ en la vegetación arbórea, 44.91 Mg ha⁻¹ en mantillo y 84.03 Mg ha⁻¹ en suelo. La cobertura

arbórea *Pinus-Quercus* almacena más carbono en el arbolado con 71.74 Mg ha⁻¹, y entre todos los sitios existe una correlación positiva entre la biomasa arbórea total de *Quercus* con el COS. Esto probablemente se debe a la acumulación y descomposición más rápida de su hojarasca comparado con las acículas de *Pinus* spp. Estimamos que se almacena un total de 9267 Mg de carbono en las 50 ha de bosque templado del ANP El Faro, contenido que se liberaría si el área se deforesta, evidenciando la importancia de su conservación.

Palabras clave: COS, mantillo, suelos forestales, suelos volcánicos.

SUMMARY

Despite restoration efforts, Mexico loses on average 500 000 ha of temperate forests annually, releasing the carbon stored in plant tissues, leaf litter, and soils into the atmosphere. Much of the temperate forests of Mexico grow on volcanic soils (Andosols), which cover approximately 1.2% of the country's area. However, little information is available on how much carbon is stored in soil, leaf litter, and arboreal components of these systems. Therefore, the objective of this study was to determine organic carbon concentration in trees, litter, and soil in “El Faro” Protected Natural Area in Tlalmanalco, Estado de Mexico. This research selected

Cita recomendada:

Cano-Flores, O., G. Vela-Correa, O. A. Acevedo-Sandoval y M. Á. Valera-Pérez. 2020. Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del Área Natural Protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México. Terra Latinoamericana 38: 895-905.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.757>

Recibido: 28 de febrero de 2020.

Aceptado: 25 de junio de 2020.

Publicado en Terra Latinoamericana 38: 895-905.

eight study sites under four tree-cover categories: *Cupressus-Pinus*, *Pinus-Quercus*, *Quercus-Pinus* and *Quercus*, and determined species and normal diameter (DN) of trees with DN larger than 10 cm, samples of leaf litter and soil were collected at a depth of 0-20 cm. Soil organic carbon (SOC) concentration was determined in the laboratory in an elemental analyzer, as well as bulk density, porosity, and rock volume. Total carbon stored by trees was estimated using species-specific allometric formulas. The average total carbon content was 185.34 Mg ha⁻¹, with an overall average of 56.40 Mg ha⁻¹ in trees, 44.91 Mg ha⁻¹ in leaf litter, and 84.03 Mg ha⁻¹ in soil. The tree cover storing the most carbon in vegetation was *Pinus-Quercus*, with 71.74 Mg ha⁻¹, and across all the study sites a positive correlation was recorded between total *Quercus* tree biomass and SOC. This result was probably due to faster accumulation and decomposition of *Quercus* leaf litter compared to pine needles. Based on the estimates of this study, 50 ha of El Faro protected natural area stored a total of 9267 Mg of carbon that could be released if the area were deforested, evidencing the importance of its conservation.

Index words: SOC, mulch, forest soils, volcanic soils.

INTRODUCCIÓN

La dependencia en los combustibles fósiles, el cambio de uso de suelo y la deforestación son de los principales factores contribuyentes al aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), entre ellos, el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (IPCC, 2003; FAO, 2002). Se considera al CO₂ como el gas que más influyen al efecto invernadero, y de continuar con el incremento de estos gases a la atmósfera, se predice que se intensificarán los efectos hasta volverlos más drásticos, como lluvias más torrenciales y sequías más intensas y duraderas. Se estima que para el año 2100 la temperatura global aumentará entre 1.0 y 4.5 °C, y al paso de los años estas condiciones pueden ser críticas y no tener un punto de retorno (Pardos, 2010).

Una forma sencilla de disminuir los gases que intensifican los efectos del cambio climático es mantener los sumideros terrestres naturales de carbono, como los son los bosques, que cubren 4.03 millones de hectáreas (30% de la superficie terrestre) a nivel mundial (FAO, 2017). Dentro de estos sistemas

forestales se encuentran los bosques templados, que almacenan cerca del 60% del carbono total terrestre solo en el suelo, y almacenar en su biomasa aérea 175 Pg (1 Pg = 10¹⁵ g), en el mantillo 43 Pg y en el suelo 262 Pg (Pan *et al.*, 2011). Por lo tanto, son fundamentales en el equilibrio del ciclo biogeoquímico del carbono y están directamente relacionados con la mitigación de los efectos del cambio climático (FAO, 2002).

Pese a la importancia de los bosques como almacén de carbono, en el periodo de 1850 a 1992 se estimó que el cambio de uso de suelo y la apertura de tierras al cultivo liberó 140 Pg de carbono de cubiertas forestales al atmósfera, que es aproximadamente el 50% del carbono liberado por el uso de combustibles fósiles en la misma temporada (Strawn *et al.*, 2015). En México, se pierden alrededor 500 000 ha·año⁻¹ de bosques templados, aunque el cambio de uso de suelo forestal ha sido más lento desde el año 2007, cuando hubo un incremento del 0.34% del área forestal debido a políticas federales que impulsaron la reforestación (Ordóñez *et al.*, 2008; Rosete-Vergés *et al.*, 2014).

Los suelos derivados del intemperismo de ceniza y vidrio volcánico ocupan el 1.2% del territorio, y se encuentran relativamente restringidos a los alrededores de los volcanes. Estos suelos están compuestos por minerales de baja cristalinidad como el alófono, la imogolita, complejos Al-humus y ferrihidrita, lo cual resulta en una alta retención de agua y fosfatos, baja densidad aparente, alta friabilidad, tendencia de formar agregados estables, así como una alta capacidad para almacenar carbono (Shoji *et al.*, 1993; SEMARNAT, 2013). En estos suelos se establecen bosques templados integrados por árboles del género *Pinus* spp. y *Quercus* spp., bosques cuya importancia recae en la captación de agua de lluvia, prevención de inundaciones y deslaves al funcionar como barrera física, función como eslabón en la cadena de acumulación y ciclaje de nutrientes, y mantenimiento de la diversidad al brindar alimento y soporte para aves, mamíferos, hongos y bromelias (Rzedowski, 2006; FAO, 2002; 2016).

El acuerdo “4 por 1000” plantea como meta un aumento anual de 0.4% del almacenaje de carbono en los suelos del mundo a través del adecuado manejo de las masas forestales, la reducción de la deforestación, y el mantenimiento de los restos orgánicos sobre el suelo (4 per 1000, 2016). Es poca la información que existe sobre el almacenamiento de carbono orgánico del suelo (COS) bajo los bosques templados. La información que domina es sobre carbono almacenado en la biomasa

aérea (Galicia *et al.*, 2016). Sin embargo, en un estudio realizado por Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011), se estimó que se almacena un promedio de 148.5 Mg C ha⁻¹ en suelos que se formaron a partir de materiales piroclásticos y que tienen una cobertura de *Pinus* spp.

La pérdida de cobertura forestal resulta no solo en la liberación a la atmósfera del carbono contenido en el tejido vegetal, sino además en la pérdida de la habilidad de fijación de CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis que esa vegetación hubiera llevado a cabo durante el resto de su ciclo de vida. El mantillo es considerado una interfase entre el carbono almacenado en el estrato arbóreo y el carbono que se almacenará en el suelo; es importante porque funciona como una barrera física contra la erosión y escurrimientos intensos superficiales, y además es una fuente de nutrientes que se integrarán al suelo. El suelo típicamente contiene más carbono que la vegetación y el mantillo, retiene e infiltra agua y da soporte y provee nutrientes a la vegetación (Ordóñez *et al.*, 2008; Kuennecke, 2008; Thiers *et al.*, 2014; Strawn *et al.*, 2015). Dado que tanto vegetación, mantillo y suelo forman parte del ciclo biogeoquímico del carbono y almacenan cantidades sustanciales de carbono, es importante estimar el contenido de carbono en cada uno de estos tres compartimentos para evaluar las posibles consecuencias en términos de liberación de carbono provocados por la deforestación en una zona determinada (Ordóñez *et al.*, 2008; Ruiz-Díaz *et al.*, 2014; Domke *et al.*, 2016; Bolaños González *et al.*, 2017). El entendimiento de la dinámica del carbono en cada uno de estos compartimentos puede contribuir a la generación de estrategias de manejo adecuadas para su conservación (Anaya *et al.*, 2016; Galicia *et al.*, 2016). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar las concentraciones de carbono orgánico total en el estrato arbóreo, mantillo y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características Fisiográficas del Área de Estudio

El área natural protegida El Faro pertenece al municipio de Tlalmanalco, Estado de México, y se ubica entre las coordenadas 19° 80' 48" y 19° 15' 43" N y 98° 37' 58" y 98° 51' 20" O (Noyola-Rocha y Méndez-Lavielle, 2010). Cuenta con una superficie de 50 ha,

que está cubierta por bosque templado conformado por *Pinus leiophylla*, *P. patula*, *Quercus* spp., *Cupressus lusitanica* y *Arbutus xalapensis*. El clima es Cb (w2) (w) k'ig, corresponde a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 13.2 °C y una precipitación anual de 1092.6 mm (García, 2004). Los suelos que dominan en el área de estudio están constituidos por depósitos de materiales piroclásticos como cenizas y lapilli pumítico, que al intemperizarse se consolidan en andosoles vítricos, húmicos, mólicos y ócricos (Chávez y Trigo, 1996).

Sitios de Muestreo y Trabajo en Campo

Se utilizaron imágenes satelitales del programa Google Earth (2018) para seleccionar ocho sitios de muestreo distribuidos a una distancia de 200 m entre cada uno para cubrir sistemáticamente las 50 ha de bosque mixto del ANP. El trabajo de campo se realizó del siete de marzo al siete de mayo de 2018. Para definir los sitios de trabajo se realizaron recorridos del área de estudio, considerando como criterios que no hubiera basura visible y que presentara cobertura vegetal homogénea (sin claros, ni caminos o senderos) (Figura 1).

Ya definidos los sitios de trabajo, se utilizó la metodología establecida por CONAFOR (2011), que consistió en trazar un círculo en cada sitio de muestreo de 17.8 m de radio para cubrir un área de 1000 m², donde se describieron sus características fisiográficas como la altitud, pendiente, forma y posición en la ladera, drenaje superficial y pedregosidad (Vela-Correa *et al.*, 2011).

Para estimar la biomasa y carbono arbóreo se midió el diámetro normal (DN) a la altura de 1.30 m del suelo de los árboles con un diámetro mayor a 10 cm con un calíper marca Haglof. Cada árbol fue contado y su especie determinada usando las claves de Sánchez-Sánchez (1980), y se confirmó la especie reportada con base en lo mencionado por Gernandt y Pérez-De La Rosa (2014). Los sitios se agruparon en cuatro categorías dependiendo de la composición arbórea: *Cupressus-Pinus*, *Pinus-Quercus*, *Quercus-Pinus* y *Quercus* spp. (nombrado por la especie dominante). Además de la biomasa y el carbono total del arbolado de cada sitio, se calculó la contribución de biomasa y carbono separando en tres categorías diamétricas: árboles chicos (de 10 a 29.9 cm de DN), medianos (30.0 a 59.9 cm de DN) y grandes (>60 cm DN).

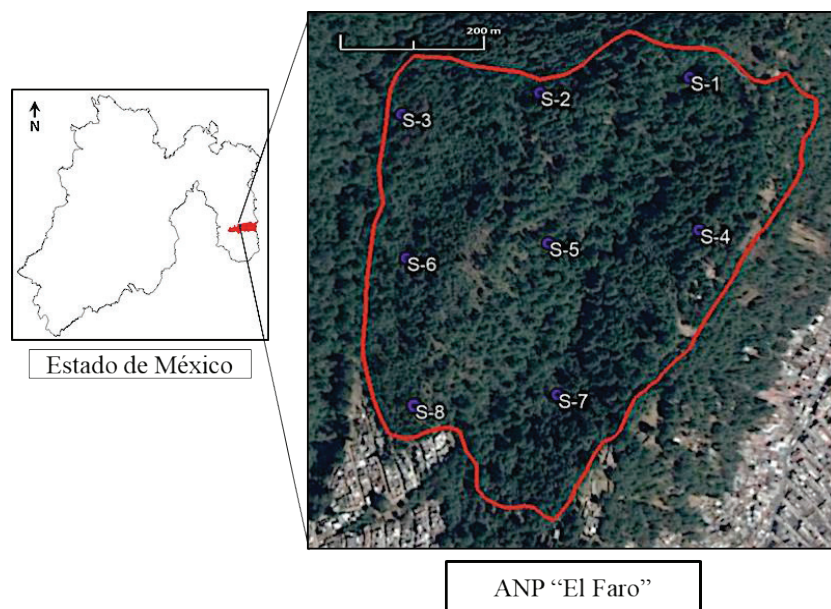


Figura 1. Ubicación del área de estudio y los sitios de muestreo. El Faro municipio de Tlalmanalco, Estado de México.

Figure 1. Location of the study area and sampling sites. El Faro municipality of Tlalmanalco, Estado de Mexico.

Para tomar la muestra de mantillo, se colocó en el centro de cada sitio de muestreo un marco cuadrado de metal de 15 cm por lado. Con un cuchillo se cortó todo el mantillo que quedara dentro del cuadro y posteriormente se midió su espesor. La muestra excluyó vegetación viva, restos leñosos mayores a 0.6 cm de diámetro, conos y ramas (Domke *et al.*, 2016).

El suelo se colectó en el mismo punto que el mantillo. Se marcó un cuadro con el ancho de una pala plana y se removió el suelo hasta llegar a una profundidad de 20 cm, medida con un estadal. Se usó la pala para extraer una muestra de aproximadamente 1.5 kg de suelo, cavando de forma paralela a la pared del pozo para extraer la misma cantidad de suelo desde la superficie hasta los 20 cm de profundidad. El suelo se colocó en una bolsa de polietileno para su posterior análisis en laboratorio.

Trabajo en Laboratorio y Análisis de Datos

Las muestras de suelos se secaron a temperatura ambiente, se molieron en un mortero de ágata y tamizaron con una malla de apertura de 2 mm de diámetro. A cada una de ellas se les determinó la densidad aparente (Foth, 1990). Las muestras de mantillo fueron secadas a 70 °C en un horno de

secado ECOSHEL modelo 9053A hasta tener un peso constante, y se molieron en un mortero de ágata para homogeneizar la muestra para su análisis de carbono (Thiers *et al.*, 2014). La densidad del mantillo se determinó dividiendo el peso seco entre el volumen de la muestra (15 × 15 cm × espesor del mantillo en cm). Se determinó la concentración de carbono orgánico total en las muestras de suelo y mantillo por combustión en un analizador elemental Thermo Scientific modelo Flash 2000. La cantidad de carbono orgánico en suelo y en mantillo (CO) se calculó con la siguiente fórmula (IPCC, 2003):

$$CO = [CO](D)(P)(1 - FRAG)(10) \quad (1)$$

donde: CO = la cantidad de carbono en el suelo o mantillo (Mg ha⁻¹), [CO] = la concentración de carbono orgánico determinado en laboratorio (g C kg muestra seca⁻¹), D = densidad (para suelo, densidad aparente) en Mg m⁻³, P = profundidad de la muestra (m; 0.2 m en suelos, espesor de la muestra en m en mantillo), FRAG = % de fragmentos gruesos/100 (sin dimensión; en mantillo, este valor siempre fue cero) y 10 = factor de conversión de unidades.

Para estimar la biomasa y carbono en el estrato arbóreo se utilizaron fórmulas alométricas, ecuaciones

que se basan en regresiones entre la masa y altura de los árboles. Es un método de fácil manejo, no destructivo, que utiliza datos de fácil obtención (DN). En el Cuadro 1, se integran las fórmulas alométricas utilizadas en esta investigación, cada una de las fórmulas es particular ya que cada especie arbórea tiene un desarrollo distinto de cada uno de sus componentes (fuste, ramas, hojas, conos y bellotas) durante su crecimiento (Ruiz-Díaz *et al.*, 2014).

Análisis Estadístico

Se realizó una correlación de Spearman entre el COS y 1) la biomasa aérea total, 2) la biomasa aérea de *Quercus* spp., y 3) de la biomasa sumada de *Pinus patula* y *P. leiophylla* de cada sitio, usando el paquete estadístico JMP 8.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los Sitios de Muestreo

Los sitios se encuentran distribuidos en laderas medias, y de acuerdo con la inclinación que presentan (de 8 a 32 °) la forma del relieve es de ondulado a extremadamente ondulado. Este relieve se consolidó por la efusión de lava del volcán Iztaccíhuatl, así como otros materiales piroclásticos (ceniza, lapilli) que fueron modelando el relieve e hizo que los suelos fueran profundos y permeables (SEMARNAT, 2013).

La cobertura arbórea está integrada por *Quercus* spp., que es el género más abundante, seguido por dos especies de pinos *Pinus leiophylla* y *P. patula*, y dos especies que están consideradas como vegetación asociada a los bosques templados, *Cupressus lusitánica* y *Arbutus xalapensis* (Cuadro 2). Los sitios de estudio están distribuidos altitudinalmente entre los 2576 y 2649 m; esto cae hacia el límite superior del rango altitudinal (1200 a 2800 m) donde se encuentra el 95% de las masas forestales de bosque mixto (Rzedowski, 2006).

Concentración de Carbono en el Estrato Arbóreo

El estrato arbóreo de la cobertura *Pinus-Quercus* es el que contiene más carbono, seguido por *Quercus-Pinus*, luego *Quercus* y finalmente, *Cupressus-Pinus* (Figura 2 y Cuadro 3). Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011), reportan la concentración de carbono en el arbolado para bosques templados del sur de Nuevo León, con coberturas y métodos de muestreo similares a los nuestros; ellos reportan cantidades de carbono en bosque de encino-pino similares a los que encontramos en la cobertura *Quercus-Pinus* (64.20 y 66.56 Mg ha⁻¹, respectivamente; Figura 2). Sin embargo, el contenido de carbono que nosotros encontramos en la cobertura *Pinus-Quercus* fue 26.5 Mg ha⁻¹ mayor que reportado por ellos en el bosque de pino-encino (71.74 y 45.24 Mg ha⁻¹, respectivamente) (Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011). Esta diferencia en el carbono del

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas utilizadas para estimar el contenido de biomasa y carbono.

Table 1. Allometric equations used to estimate biomass and carbon content.

| Especie | Biomasa | Autor | Carbono | Autor |
|-----------------------------|---|--|-----------------------------|--|
| | kg | | kg | |
| <i>Pinus patula</i> | $B = (0.0357)(DN^{2.6916})$ | Ruiz-Díaz <i>et al.</i> , 2014 | $C = (0.021)(DN^{2.645})$ | Ruiz-Díaz <i>et al.</i> , 2014 |
| <i>Pinus leiophylla</i> | $B = (0.40196)(DN^2)$ | Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011 | $C = (B) (0.48)$ | Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez, 2011 |
| <i>Quercus</i> spp. | $B = (0.1033)(DN^{2.39})$ | Bolaños González <i>et al.</i> , 2017 | $C = (B) (0.5)$ | IPCC, 2003 |
| <i>Cupressus lusitánica</i> | $B = (0.6266)(DN^{1.7712})$ | Bolaños González <i>et al.</i> , 2017 | $C = (0.2639)(DN^{1.7698})$ | Bolaños González <i>et al.</i> , 2017 |
| <i>Arbutus xalapensis</i> | $B = (0.3764)(DN^{2-2.3146})(DN^{-1.9106})$ | Aguilar-Hernández <i>et al.</i> , 2016 | $C = (B) (0.5)$ | IPCC, 2003 |

DN = diámetro normal; 0.5 = factor de conversión estandarizado en el ICPP (2003).

DN = normal diameter; 0.5 = standardized conversion factor in the ICPP (2003).

Cuadro 2. Distribución de las especies que integran las distintas coberturas arbóreas. El Faro, Tlalmanalco, Estado de México.
Table 2. Distribution of the species that make up the different tree cover. El Faro municipality of Tlalmanalco, Estado de Mexico.

| Cobertura | n (sitio #) | Media de individuos por sitio (1000 m ²) | | | | | Total de individuos |
|------------------------|----------------|--|-------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|
| | | <i>Quercus</i> spp. | <i>Pinus leiophylla</i> | <i>Pinus patula</i> | <i>Cupressus lusitánica</i> | <i>Arbutus xalapensis</i> | |
| <i>Cupressus-Pinus</i> | 1 (2) | 1 | 5 | 0 | 7 | 0 | 13 |
| <i>Pinus-Quercus</i> | 2 (1, 4) | 10 | 6 | 7 | 4 | 2 | 29 |
| <i>Quercus-Pinus</i> | 1 (8) | 17 | 7 | 0 | 0 | 2 | 26 |
| <i>Quercus</i> | 4 (3, 5, 6, 7) | 18 | 2.25 | 0 | 0.75 | 1.75 | 22.75 |
| Total | 8 | 46 | 20.25 | 7 | 11.75 | 5.75 | 90.75 |

n = número de sitios; sitio # = identificador de sitio.

n = number of sites; site # = site identifier.

arbolado se debe principalmente a un mayor número de árboles de DN > 60 cm, resultando en un mayor contenido de carbono promedio por individuo, en nuestra zona de estudio comparado con el estudio de Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011), árboles totales ha⁻¹ fueron 290 y 275, árboles con DN > 60 cm ha⁻¹ fueron 40 y 20, carbono individuo⁻¹ fue de 0.24 y 0.16.

Cantidad de Carbono en el Mantillo

El contenido de carbono en mantillo más elevado se encontró en la cobertura de *Pinus-Quercus*, seguido por la de *Quercus-Pinus*, *Quercus*, y finalmente, *Cupressus-Pinus* (Figura 2). Comparamos los resultados de esta investigación con los de dos estudios: Ordóñez *et al.* (2008) y Domke *et al.* (2016). Encontramos cantidades

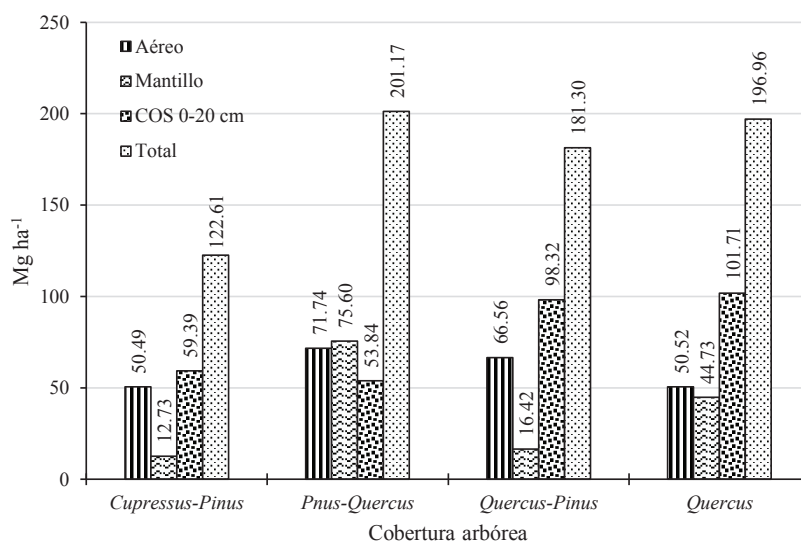


Figura 2. Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado, mantillo y suelos por cobertura arbórea (ver Cuadro 2, en el cuadro se especifica cuales especies arbóreas componen cada cobertura). El Faro, Tlalmanalco, Estado de México.

Figure 2. Organic carbon concentrations in woodland, mulch and soils by tree cover (see Table 2, the table specifies which tree species make up each cover). El Faro municipality of Tlalmanalco, Estado de Mexico.

Cuadro 3. Biomasa y carbono total distribuido por cobertura arbórea y tamaño del árbol.
Table 3. Biomass and total carbon distributed by tree cover and tree size.

| Tamaño de árbol (rango de DN) | <i>Cupressus-Pinus</i> | | | <i>Pinus-Quercus</i> | | | <i>Quercus-Pinus</i> | | | <i>Quercus</i> | | |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------|---------|----------------------|---------------------------|---------|----------------------|---------------------------|---------|----------------|---------------------------|---------|
| | NPA | Biomasa | Carbono | NPA | Biomasa | Carbono | NPA | Biomasa | Carbono | NPA | Biomasa | Carbono |
| cm | | - - - Mg ha ⁻¹ | - - - | | - - - Mg ha ⁻¹ | - - - | | - - - Mg ha ⁻¹ | - - - | | - - - Mg ha ⁻¹ | - - - |
| Chico (10-29.9) | 1 | 2.49 | 1.24 | 13.5 | 15.59 | 6.44 | 15 | 13.81 | 6.91 | 15.5 | 20.52 | 10.26 |
| Mediano (30-59.9) | 9 | 68.70 | 33.47 | 11.5 | 114.35 | 38.39 | 9 | 90.95 | 44.32 | 4.75 | 31.46 | 15.61 |
| Grande (>60) | 3 | 32.29 | 15.78 | 4 | 70.62 | 26.91 | 2 | 31.94 | 15.33 | 2.50 | 50.37 | 24.65 |
| Total | 13 | 103.48 | 50.49 | 29 | 200.61 | 71.74 | 26 | 136.70 | 66.56 | 22.75 | 102.35 | 50.52 |

NPA = número promedio de árboles; DN = diámetro normal.
 NPA = average number of trees; DN = normal diameter.

de carbono en el mantillo entre 4 y 24 veces más altos (Figura 2) que lo reportado por Ordóñez *et al.* (2008), aunque muestran un patrón similar en el contenido relativo de carbono total entre sus coberturas arbóreas; el bosque de pino-encino, encino y pino contienen 3.8, 3.2 y 3.0 Mg ha⁻¹ de carbono en el mantillo, respectivamente. El estudio de Domke *et al.* (2016) reportan un rango amplio de contenidos de carbono en el mantillo bajo coberturas similares. En los bosques del norte de Estados Unidos, los de pino contienen más que los de hojas anchas, con 11.53 y 9.36 Mg ha⁻¹ respectivamente, mientras que pasa lo contrario en los bosques del noroeste, donde los bosques mixtos integrados por coníferas y hojas anchas contienen 6.13 Mg ha⁻¹ y los de hoja ancha 8.67 Mg ha⁻¹. Aunque son útiles para poner en contexto nuestros resultados, estas comparaciones son difíciles de interpretar, y no es claro que tan generalizables son, dado que hay una gran variabilidad en el contenido de carbono que depende de muchos factores tanto generales como particulares (escala del estudio, metodología de muestreo, temporalidad, clima y cobertura arbórea) que varían entre estudios, e incluso dentro del mismo estudio (p. ej., rango de contenido de carbono en mantillo entre 0 y 111 Mg ha⁻¹) Domke *et al.*, 2016.

El contenido de carbono en el mantillo es el resultado, por un lado, del aporte de carbono de las hojas (fijación de CO₂ a través de la fotosíntesis), y por otro, de la salida de carbono al incorporarse al suelo a través de la descomposición. En otras palabras, el contenido de carbono en mantillo es un balance entre el ingreso y egreso de carbono en el transcurso de su ciclo biogeoquímico en este bosque templado. En los bosques

dominadas por *Quercus* spp. (aquí las coberturas *Quercus-Pinus* y *Quercus*) el desprendimiento de hojas anchas es relativamente rápido y frecuente (Thiers *et al.*, 2014). Al mismo tiempo, el mantillo bajo la cobertura de *Pinus-Quercus* se integra más rápidamente al suelo comparado con coberturas que contienen coníferas, porque las hojas anchas están conformadas en un 30% por compuestos hidrosolubles (azúcares solubles y compuestos nitrogenados) comparado con un 7% en las hojas de coníferas (Berg y McLaugherty, 2008). El mantillo de hojas anchas es rica en nitrógeno y celulosa (compuestos más accesibles para la actividad biológica) pero con poco contenido de lignina. Las acículas presentan pocos compuestos de fácil descomposición y más lignina, lo que conjuga bajas y lentas tasas de descomposición, y su descomposición libera ácidos orgánicos que disminuyen la actividad biológica como la colonización de hongos y bacterias (Berg y McLaugherty, 2008; Thiers *et al.*, 2014; Gallardo-Lancho, 2017). Es posible que estos dos factores en conjunto expliquen el hecho de que, en estas dos coberturas, hay menor contenido de carbono en el mantillo, pero mayor contenido de carbono en el suelo que en las coberturas dominadas por coníferas. En otras palabras, en estas coberturas, el mantillo puede ser un almacén más transitorio de carbono que en las coberturas dominadas por coníferas. Parece ocurrir lo opuesto en la cobertura *Cupressus-Pinus*, donde el desprendimiento de hojas al mantillo es menos frecuente, por lo que el mantillo bajo esta cobertura contiene la menor cantidad de carbono (Figura 2). Además, las hojas de las coníferas presentan más compuestos recalcitrantes, haciendo más lenta

su descomposición (Almendros *et al.*, 2000; Berg y McClaugherty, 2008), lo cual explicaría por qué hay menor contenido de carbono tanto en mantillo como en suelo (Figura 2). En la cobertura de *Pinus-Quercus*, el contenido de carbono es mayor que en las otras coberturas, y es más elevado en mantillo que en el arbolado y en el suelo (Figura 2). En esta cobertura, están presentes todas las especies arbóreas reportadas en esta investigación. Hipotetizamos que el alto contenido de carbono en mantillo se debe a que, por un lado, esta cobertura recibe el aporte frecuente y voluminoso de hojarasca de los árboles de hoja ancha, y por otro, la integración de carbono al suelo por descomposición es lenta debido a la presencia de hojas de coníferas. Por lo tanto, el mantillo se acumula, y parece ser un almacén menos dinámico que en las demás coberturas.

Concentraciones de Carbono en los Suelos

Las coberturas *Quercus-Pinus* y *Quercus* contienen casi el doble de carbono orgánico del suelo (COS) que las coberturas dominadas por coníferas (*Cupressus-Pinus* y *Pinus-Quercus*; Figura 2). Estos resultados son similares a los de Ordóñez *et al.* (2008) y Vela-Correa *et al.* (2012), donde las coberturas arbóreas dominadas por *Quercus* spp. almacenaron más carbono en los suelos. Esto probablemente se debe a diferencias en varios factores físicos y químicos de las hojas que impactan en el proceso de descomposición del mantillo. En general, la integración de carbono y nutrientes al suelo es más rápido en hojas de *Quercus* spp. que hojas de coníferas (Chávez-Vergara *et al.*, 2014), en parte porque las hojas anchas contienen menos lignina (Thiers *et al.*, 2014; Gallardo-Lancho, 2017) y más compuestos hidrosolubles (Berg y McClaugherty, 2008). Además, la humedad funciona como “catalizador” de la actividad biológica (acelera o disminuye la colonización de hongos y bacterias) que son parte del proceso de descomposición del mantillo (Berg y McClaugherty, 2008; Thiers *et al.*, 2014).

La cobertura de *Pinus-Quercus* almacena menos carbono en suelos que el resto de las coberturas reportadas en este estudio (Figura 2). Este contenido de carbono en el suelo es similar a las encontradas por Acosta-Mireles *et al.* (2008), quienes reportan para muestras de suelo colectadas de 0 a 20 cm de profundidad del bosque de pino-encino y hojosas 65.3 Mg ha⁻¹ de carbono.

En los ecosistemas forestales el COS almacenado se considera un indicador indirecto de la calidad de los suelos; está estrechamente relacionado con la materia orgánica y tiene un impacto positivo en las propiedades físicas de suelo. El COS mejora la estructura del suelo, forma agregados más estables, hace a los suelos más permeables, y disminuye el potencial de erosión (Alvarado *et al.*, 2013). Por otra parte, el COS tiene una estrecha relación con las propiedades biológicas, ya que cuando aumenta el contenido de materia orgánica tiende a incrementar la actividad biológica, por lo que el reciclaje de nutrientes es constante. Por consiguiente, el carbono, nitrógeno y fósforo se integran eficientemente al suelo (Gallardo-Lancho, 2017).

Correspondencia entre la Biomasa Arbórea y Carbono en Suelo

En el Cuadro 4 se muestra que existe una correlación positiva entre COS y la biomasa aérea total de individuos de *Quercus* spp., que indica que mientras se incrementa la biomasa aérea total de *Quercus* spp., aumenta el carbono total en los suelos. Sin embargo, no hubo relación entre el COS y biomasa de *Pinus* spp. ni con la biomasa arbórea total (Cuadro 4). Esto es consistente con la diferencia en la rapidez de descomposición entre hojas anchas y coníferas y la renovación más frecuente de hojas en *Quercus* spp. que en *Pinus* spp. mencionadas en secciones anteriores.

Cuadro 4. Correlación de Spearman entre la biomasa arbórea (total, *Quercus* spp., y *P. leiophylla* + *P. patula*) y contenido de carbono en suelo y mantillo.

Table 4. Spearman's correlation between tree biomass (total, *Quercus* spp., and *P. leiophylla* + *P. patula*) and soil and mulch carbon content.

| Biomasa | Carbono | ρ de Spearman | <i>P</i> |
|---------------------|----------|--------------------|----------|
| Arbórea total | Suelo | -0.1667 | 0.6932 |
| <i>Quercus</i> spp. | Suelo | 0.7143 | 0.0465 |
| <i>Pinus</i> spp. | Suelo | -0.3571 | 0.3851 |
| Arbórea total | Mantillo | 0.2619 | 0.5309 |
| <i>Quercus</i> spp. | Mantillo | 0.1190 | 0.7789 |
| <i>Pinus</i> spp. | Mantillo | 0.0000 | ~1.000 |

Al producirse más frecuentemente y ser integrado más rápidamente al suelo, las hojas de *Quercus* spp. son determinantes de la cantidad de carbono en suelo, como es demostrado por esta correlación positiva.

CONCLUSIONES

- Las concentraciones promedio de carbono en la sede forestal del área natural protegida (ANP) El Faro, fueron de 56.40 Mg ha⁻¹ para el estrato arbóreo, 44.91 Mg ha⁻¹ para el mantillo y 84.03 Mg ha⁻¹ para el suelo.
- La cobertura que almacenó más carbono fue *Pinus-Quercus*, con 201.17 Mg ha⁻¹ incluido el estrato arbóreo con 71.74 Mg ha⁻¹, el mantillo con 75.60 Mg ha⁻¹ y el suelo 53.84 Mg ha⁻¹.
- Existe una proporción sustancial en el carbono en el estrato arbóreo que es de árboles grandes (22.94 Mg ha⁻¹), mostrando la importancia de mantener estos árboles en el bosque templado.
- Existe una correlación positiva entre la biomasa arbórea total de *Quercus* spp. con el carbono orgánico del suelo (COS), que podría deberse a que *Quercus* spp. aporta más carbono al suelo, ya que sus hojas se renuevan más frecuentemente y se descomponen más rápido que las de *Pinus* spp.
- Se estima que las 50 ha de bosque templado del ANP contiene 9267 Mg de carbono (incluido el arbolado, mantillo y suelo) que se liberaría si se deforesta esta área.
- La estimación del contenido de carbono en los diferentes estratos permite determinar el potencial que tiene este bosque para integrar y mantener carbono, así como contribuir en los procesos para mitigar los efectos del cambio climático.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados y analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

El autor de correspondencia (Oscar Cano Flores) recibió una beca nacional de posgrado de CONACYT.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, recursos, escritura: preparación del borrador original, revisión y edición, visualización: Oscar Cano Flores. Conceptualización, metodología, recursos, escritura: revisión y edición, supervisión: Gilberto Vela Correa. Supervisión: Otilio Arturo Acevedo Sandoval y Miguel Ángel Valera Pérez.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación. Así como al personal a cargo del área natural protegida El Faro, Rebeca López Reyes, Álvaro Arvizu Aguiñiga, Omar Arvizu López, Andrés Gutiérrez y Gregorio Rodríguez ya que sin su apoyo no hubiera sido posible la realización de este trabajo. También a los compañeros y amigos Rubén Alonso Contreras Tapia, Margarita Zamora García, Ángel Antonio Enríquez Díaz, Ángel Eduardo Sosa López, Julio Camacho Hernández[†] y Norma Cruz López que colaboraron en las diversas actividades del trabajo en campo. A Lynna Marie Kiere por sus valiosos comentarios en la redacción del manuscrito y el apoyo en la parte estadística.

LITERATURA CITADA

- 4 per 1000. 2016. Governance of the “4 per 1000” Initiative. <https://www.4p1000.org/> Governance. Montpellier, France. (Consulta: septiembre 29, 2020).
- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo-Anzures y M. Díaz-Lavariega. 2008. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. Terra Latinoamericana 27: 105-114.

- Aguilar-Hernández, L., R. García-Martínez, A. Gómez-Miraflor y O. Martínez-Gómez. 2016. Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*). pp. 529-530. In: J. J. Magdaleno-Villar, J. Martínez-Solis, N. Magaña-Lira y M. López-Rojo. (eds.). Memoria del IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. Universidad Autónoma Chapingo, 20 al 22 de abril de 2016. Chapingo, Estado de México, México.
- Aguirre-Calderón, O. A. y J. Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación del Contenido de Carbono en Bosques del Sur de Nuevo León. *Rev. Mex. Cienc. For.* 2: 73-84.
- Almendros, G., J. Dorado, F. J. González-Vila, M. J. Blanco, and U. Lankes. 2000. ¹³C NMR assessment of decomposition patterns during composting of forest and shrub biomass. *Soil Biol. Biochem.* 32: 793-804. doi: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00202-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00202-3).
- Alvarado, J., H. J. Andrade y M. Segura. 2013. Almacenamiento de carbono orgánico en suelos en sistemas de producción de café (*Coffea arabica* L.) en el municipio del Líbano. *Colomb. For.* 16: 21-31.
- Anaya, C. A., M. Mendoza, M. Rivera, R. Páez y L. D. Olivares-Martínez. 2016. Contenido de carbono orgánico y retención de agua en suelos de un bosque de niebla en Michoacán, México. *Agrociencia* 50: 251-269.
- Bolaños González, Y., M. A. Bolaños González, F. Paz Pellat y J. I. Ponce Pulido. 2017. Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana* 35: 73-86.
- Berg, B. and C. McClaugherty. 2008. Plant litter decomposition, humus formation, carbon sequestration. Springer-Verlag GmbH. Heidelberg, Germany. eBook ISBN: 978-3-662-05349-2.
- Chávez C., J. M. y N. Trigo B. 1996. Programa de manejo para el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Colección Ecología y Planeación. Universidad Autónoma Metropolitana. México. ISBN: 970620637X.
- Chávez-Vergara, B., A. Merino, G. Vázquez-Marrufo, and F. García-Oliva. 2014. Organic matter dynamics and microbial activity during decomposition of forest floor under two native neotropical oak species in a temperate deciduous forest in Mexico. *Geoderma* 235-236: 133-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.005>.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Manual y procedimientos para el muestreo de campo Re-muestreo 2011. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. CONAFOR-SEMARNAT. México, D. F.
- Cruz-Flores, G. y J. D. Etchevers-Barra. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia* 45: 849-862.
- Domke, G. M., C. H. Perry, B. F. Walters, C. W. Woodall, M. B. Russell, and J. E. Smith. 2016. Estimating litter carbon stocks on forest land in the United States. *Sci. Total Environ.* (557-558): 469-478. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.090>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos 96. FAO. Roma, Italia. ISBN: 92-5-304690-2.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2016. Estado de los bosques del mundo. Resumen. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades. FAO. Roma, Italia. ISBN: 978-92-5-309208-6.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2017. Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto. FAO. Roma, Italia. ISBN: 978-92-5-309681-7.
- Foth, H. D. 1990. Fundamentals of soil science. John Wiley and Sons. New York, NY, USA. ISBN-13: 978-0471522799.
- Galicia, L., A. M. Gamboa-Cáceres, S. Cram, B. Chávez-Vergara, V. Peña-Ramírez., V. Saynes y C. Siebe. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* 34: 1-29.
- Gallardo-Lancho, J. F. 2017. La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. SiFyQA. Salamanca, España. ISBN-13: 978-8493743772.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Gernandt, D. S. y J. A. Pérez-De La Rosa. 2014. Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Rev. Mex. Biodiv.* 85: S126-S133. doi: <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC. New York, NY, USA. ISBN: 4-88788-003-0.
- Kuennecke, B. H. 2008. Temperate forest biomes. Greenwood Press. Westport, CT, USA. ISBN-13: 978-0313340185
- Noyola-Rocha, J. y G. Méndez-Lavielle. 2010. Tlalmanalco. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de México. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15103a.html>. (Consulta: octubre 17, 2018).
- Ordóñez, J. A. B., B. H. J. de Jong, F. García-Oliva, F. L. Aviña, J. V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez, and O. Masera. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *For. Ecol. Manage.* 255: 2074-2084. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.024>.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-994.
- Pardos, J. A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid, España. ISBN: 978-84-7498-529-0.
- Rosete-Vergés, F. A., J. L. Pérez-Damián, M. Villalobos-Delgado, E. N. Bavarro-Salas, E. Salinas-Chávez y R. Remond-Noa. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques* 20: 21-35. doi: <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201173>.
- Ruiz-Díaz, C., G. Rodríguez-Ortiz, J. C. Leyva-López y J. R. Enríquez-Del Valle. 2014. Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Natur. Desar.* 12: 28-45.
- Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. CONABIO. México, D. F.

- Sánchez-Sánchez, O. 1980. La flora del Valle de México. Ed. Herrero. México, D. F. ISBN: 9789684200869.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Programa de manejo parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. SEMARNAT, CONANP. México, D. F.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Elsevier Science. Amsterdam, The Netherlands. ISBN: 0-444-89799-2.
- Strawn, D. G., H. L. Bohn, and G. A. O'Connor. 2015. Soil chemistry. Wiley Blackwell. Hoboken, NJ, USA. ISBN-13: 978-1118629239.
- Thiers, O., J. Reyes, V. Gerding y J. E. Schlatter. 2014. Suelos en ecosistemas forestales. pp. 133-178. *In:* C. Donoso, M. E. González y A. Lara. (eds.). Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile. Ed. UACH. Valdivia, Chile.
- Vela-Correa, G., Ma. L. Rodríguez-Gamiño y J. López-Blanco. 2011. Descripción morfológica de perfiles de suelos (Manual para trabajo en campo). Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. CBS Manual 33. Mexico, D. F.
- Vela-Correa, G., J. López B y Ma. L. Rodríguez G. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Invest. Geogr.* 77: 18-30.