



Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp.

Soil organic carbon and root biomass of *Quercus* sp.

Jesús D. Gómez¹, Jorge D. Etchevers², Alejandro I. Monterroso^{1*}, Julio Campo³, Keit Paustian⁴ y Carlos Asensio⁵

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Chapingo, Estado de México, México.

² Colegio de Postgraduados. Laboratorio de Fertilidad de Suelos. Montecillo, Estado de México, México.

³ Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Ciudad de México, México.

⁴ Colorado State University. Natural Resources Ecology Laboratory. Fort Collins, CO, USA.

⁵ Universidad de Almería. Departamento de Agronomía. Almería, España.

* Autor de correspondencia: aimrivas@correo.chapingo.mx

RESUMEN

Se estudió la distribución de la biomasa de raíces finas, medias y gruesas, la concentración carbono orgánico del suelo (COS), la densidad aparente (Da), los almacenes de COS, en los primeros 90 cm de profundidad en tres bosques con predominio de encino (*Quercus* sp.) ubicados en la zona centro de México (Morelos). La edad estimada de los árboles de los tres bosques fue (a) \approx 40 años o maduro, \approx 20 años o medio y \approx 10 años o joven. En general, la concentración de COS y los almacenes de COS decrecieron a medida que lo hacía la profundidad del suelo, en tanto que la Da aumentaba. Más de la mitad del COS almacenado se encontró en los primeros 30 cm del perfil. La biomasa de raíces finas presentó un patrón de disminución exponencial con la profundidad, mientras que la biomasa de las raíces medias y gruesas tuvo un patrón irregular, pero siempre con tendencia a disminuir a medida que lo hacía la profundidad. En los bosques de las tres edades indicadas, la biomasa de raíces finas, medias y gruesas presentó mayor correlación con la Da que con los almacenes de carbono orgánico del suelo. Los coeficientes de ajustes (R^2) de los modelos de regresión lineal que relacionan Da con el contenido de COS se ubicaron entre 0.61 y 0.72.

PALABRAS CLAVE: acumulación de carbono y raíces; distribución de raíces finas, medias y gruesas con la profundidad; Sierra de Huautla, Morelos; suelos forestales.

ABSTRACT

The distribution of the biomass of fine, medium, and thick roots, the concentration of soil organic carbon (COS), the apparent density (Da), the COS stores in the first 90 cm of depth were studied in three forests with a predominance of oak (*Quercus* sp.) located in central Mexico (Morelos). The estimated age of the trees in the forests was (a) \approx 40 years or late, (b) \approx 20 years, and (c) \approx 10 years or earlier. We found that the SOC concentration and SOC stores decreased as the soil depth increased while the Da increased. More than half of the stored COS accumulates in the first 30 cm of the profile. The biomass of fine roots presented an exponential decrease pattern as depth increased, while the biomass of medium and thick roots had an irregular pattern, but always with a tendency to decrease as depth did. In the forests of the three indicated ages, the biomass of fine, medium, and thick roots had a higher correlation with Da than with COS stores. The regression coefficients (R^2) of the linear models relating Da to the COS content were in the range of 0.61 and 0.72.

KEYWORDS: carbon and roots accumulation; distribution of fine, medium and thick roots with depth; Sierra de Huautla, Morelos; forest soil.

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica (MOS) se encuentra en el suelo en tres diferentes almacenes generales o *pools*: libre, o como residuos poco o escasamente transformados, transformados completamente y estabilizados formando complejos con los materiales inorgánicos en este; y en la biomasa de raíces y organismos vivos del suelo. La MOS poco o escasamente transformada constituye un reservorio de carbono (COS) que suministra la energía vital requerida por los organismos que habitan en ese medio. Además, constituye una reserva que se relaciona con la sustentabilidad del sistema suelo y mejora sus propiedades físicas y químicas. El COS está estrechamente relacionado con el cambio climático por ser componente de su ciclo biogeoquímico y fuente primaria del CO₂ atmosférico (Daly *et al.*, 2000; Grace, 2004; Oliver *et al.*, 2004; Paustian *et al.*, 2016).

Por otro lado, el COS es parte constituyente del mayor reservorio terrestre de este elemento (Janzen, 2004); la otra parte es C inorgánico. El COS contiene más C que la atmósfera y la biosfera juntas (Grace, 2004) y actúa como receptor final del C que capturan las plantas desde el aire para la fotosíntesis (Gal, Vyn, Micheli, Kladivko y McFee, 2007). Del total de COS, aproximadamente 40% se encuentra en los ecosistemas forestales (Janzen, 2004), lo que significa que su dinámica tiene implicaciones importantes para el inventario global del carbono.

El COS también es fundamental para sostener la fertilidad del suelo y se asocia con la productividad del ecosistema. Su contenido se usa como indicador de calidad del suelo (Pattison *et al.*, 2008). Por lo anteriormente señalado, se considera que un mayor y mejor conocimiento de la distribución de la MOS, y por consecuencia del COS, en los bosques nativos y secundarios de México, contribuirá a una comprensión más acabada de cómo esta influye en las propiedades físicas y químicas del suelo, entre ellas la porosidad, la retención del agua y el reservorio de N, P, S y K para los árboles (Bandaranayake, Qian, Parton, Ojima y Follet, 2003; Meersmans, Wesemael, De Ridder y Van Molle, 2009). Consecuentemente, conocer

cuánto C hay en el suelo y promover su secuestro es una estrategia efectiva para reducir el CO₂ atmosférico y mejorar la calidad del suelo (Paustian *et al.*, 2016).

Por su parte, las raíces finas desempeñan un papel sustancial en el ciclo del C y en la acumulación de este y de otros nutrientes en el suelo forestal; su distribución vertical y horizontal en el suelo es importante para estos fines (Hodge, 2004), además de contribuir a la absorción de agua y de nutrientes por los árboles (Gill y Jackson, 2000). La biomasa de las raíces varía con relación a la estructura del rodal forestal. Entre estas características que influyen en esta variable se deben considerar: las especies de árboles que constituyen el rodal, su edad, densidad y el área basal; las propiedades del suelo y factores ambientales, tales como temperatura, precipitación, ubicación geográfica y elevación (Finér, Ohashi, Noguchi y Hirano, 2011; Leuschner y Hertel, 2002).

Por la importancia que poseen las raíces y su relación con el COS, se debe contar con estimaciones precisas de su abundancia y su distribución en diferentes tipos de usos de la tierra. Especialmente se necesitan más evaluaciones y más monitoreo de los almacenes de C del suelo para generar series de tiempo prolongadas y modelos para predecir sus comportamientos en el futuro (Beets, Oliver y Clinton, 2002). El bosque de encino (dominado *Quercus spp.*) es uno de los principales tipos de vegetación forestal en México. Este género es considerado el segundo recurso forestal maderable más importante del país, después de *Pinus*. Sus bosques cubren 5.5% del total de la superficie del país y se localizan principalmente en las regiones ecológicas templadas subhúmedas (Challenger, 1998).

OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo fue determinar la cantidad y distribución del COS y de raíces finas, medias y gruesas en perfiles del suelo de un bosque dominado por encino en tres etapas sucesionales de desarrollo. El bosque se encuentra ubicado en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México.



MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en un sitio representativo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla ubicada en la parte sur del estado de Morelos, México, dentro del Ejido El Zapote. Las coordenadas geográficas del sitio son 18° 27' 55" a 18° 28' 20" N y 99° 19' 00" a 99° 19' 35" W y su altitud va de 1785 m s.n.m. a 1970 m s.n.m. La vegetación nativa característica es bosque de encino (dominado por *Quercus* spp.). El clima predominante es semicálido, del grupo de los templados subhúmedos con lluvias de verano; 94% de la precipitación total anual, que va de 1200 mm a 1300 mm, ocurre en esa estación. La temperatura media anual se ubica entre 19 °C y 20 °C (Gómez, 2008). Los suelos son predominantemente Luvic Feozems (H1) con texturas medias a finas, muy rocosos en la superficie y en todo el perfil. El sustrato es andesita y brecha volcánica riolítica intercalada con tobas volcánicas de naturaleza ácida. Las topoformas dominantes son montañas escarpadas con valles intermontanos (Gómez, 2008). Los sitios de muestreo están ubicados en un terreno montañoso con pendientes fuertes (> 15%).

Recolección de muestras y su análisis

El muestreo del suelo y las raíces se condujo en unidades experimentales o parcelas de 1000 m² (20 m × 50 m) seleccionadas con ayuda de la experiencia local, en función del intervalo de edad aproximada del bosque de encino: joven (≈ 10 años), medio (≈ 20 años) y maduro (40 ≈ años) y en función de las características naturales del bosque. Se trató de un muestreo dirigido en función de las condiciones naturales del bosque. Se seleccionaron tres unidades experimentales con características similares que constituyeron las repeticiones. Las pendientes en los bosques joven, medio y maduro eran: 35%-45%, 40%-50% y 45%-55%, respectivamente; es decir, se pueden clasificar como fuertes. Las unidades experimentales establecidas se consideraron estructuralmente representativas y homogéneas. El diseño experimental fue de bloques, pero las uni-

dades experimentales se seleccionaron de acuerdo con un muestreo dirigido.

El muestreo de suelo y raíces se realizó durante la temporada de lluvias (julio y agosto). En cada parcela se excavaron tres trincheras (parte superior, media e inferior) a lo largo de una línea recta perpendicular a la pendiente del terreno o eje principal. Las trincheras en las partes superior e inferior de las parcelas tenían 1.5 m × 1.5 m y 0.9 m de profundidad y la central ubicada transversalmente a la dirección de la pendiente, 1.0 m × 2.0 m y 0.9 m de profundidad. En cada una de las cuatro caras del perfil se obtuvieron muestras duplicadas cada incremento de 15 cm hasta alcanzar una profundidad de 90 cm o hasta que las condiciones del terreno lo permitieron. Simultáneamente, se tomaron muestras inalteradas de 100 cm³ con una barrena *ad hoc* provista con cilindros metálicos en cada uno de los incrementos de profundidad. Estas se emplearon para determinar la densidad aparente, el C total y las raíces finas (diámetro menor a 5 mm) por el método de extracción del núcleo del suelo (Etchevers *et al.*, 2005). Las muestras de suelo se secaron al aire, se separaron y se pesaron los residuos orgánicos, raíces finas, raíces medias, así como las gravas mayores a 2 mm. La densidad aparente se determinó como lo describió Etchevers *et al.* (2005). Una alícuota de cada muestra de suelo se molió hasta pasar la malla 100 para analizar el contenido de C en un analizador automatizado (TOC) (Shimadzu 5000 A) (Etchevers *et al.*, 2005). La cantidad de COS en cada capa se calculó considerando su densidad aparente y se relacionó con el porcentaje de COS medido con un analizador automático de carbono Shimadzu 5000A. En el suelo no se detectó C inorgánico, por lo que el C medido se consideró como C orgánico. En la zanja central se recolectaron las raíces con diámetros iguales o mayores a 5 mm (raíces medianas y gruesas), a intervalos de 15 cm hasta los 90 cm de profundidad o hasta donde las condiciones del terreno lo permitieron. El suelo de cada capa se pasó por un tamiz de 5 mm y se recolectaron las raíces menores y mayores a ese diámetro. Para calcular la biomasa de raíces medianas y gruesas, estas se llevaron al

laboratorio y se secaron a 72 °C durante 7 días hasta lograr un peso constante (Etchevers *et al.*, 2005).

Análisis estadístico

Los resultados de las variables de respuesta C en el suelo y biomasa de raíces (finas, medias y gruesas), en función de los incrementos de profundidad de los perfiles cavados en las unidades experimentales instaladas en los bosques de las tres etapas sucesionales descritas, así como las cantidades acumuladas de COS y la biomasa de raíces de todo el perfil, se sometieron a un análisis PROC GLM con el paquete del software SAS (Statistical Analysis System [SAS,] 2004) y se les ajustó un modelo de regresión tal para que el coeficiente de ajuste R^2 fuese el mayor de todos los modelos probados. Para establecer la relación entre los parámetros de respuesta medidos en el suelo y la biomasa de las raíces que se extrajeron de los diferentes incrementos de profundidad se empleó el modelo potencial: $Y_i = a(Z)^b$, donde Y_i = densidad aparente, porcentaje de COS, cantidad de COS, biomasa de raíces finas o biomasa de raíces medias y gruesas; donde Z es la profundidad del suelo y, a y b , son parámetros estadísticos estimados por regresión.

También se establecieron relaciones de regresión lineal simple entre las variables de respuestas que se midieron, como biomasa de las raíces finas y de las raíces media y gruesas con: (a) la densidad aparente y (b) el COS, determinadas en las diferentes profundidades del perfil para investigar si había relación entre ellas. Para ello se empleó el software SAS (SAS, 2004).

RESULTADOS

La especie con mayor valor de importancia en los rodales de tres edades (10 años, 20 años y 40 años) fue *Quercus magnoliaefolia* Née, con 63.2%, 61.5% y 58.5% de abundancia, respectivamente.

Distribución vertical del carbono orgánico del suelo

La figura 1 muestra el tamaño del almacén total de COS en cada perfil cavado en las unidades experimentales y el

de sus respectivos incrementos de profundidad, se obtuvo de los resultados de los análisis de COS y densidad aparente. Esta última incrementó con la profundidad del suelo en los bosques, independientemente de la edad (Fig. 1a). En los primeros 15 cm del suelo, la densidad fue ligeramente menor a 1.0 Mg m^{-3} , se incrementó con la profundidad alcanzando 1.40 Mg m^{-3} , 1.43 Mg m^{-3} y 1.53 Mg m^{-3} en la capa 75 cm a 90 cm en los bosques de 40 años, 20 años y 10 años, respectivamente. En los primeros 15 cm la densidad aparente no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los bosques de diferente edad, pero en el incremento de profundidad 15 cm a 30 cm del bosque de 40 años, esta resultó ser significativamente menor ($p < 0.05$) que en los bosques de 10 años y 20 años. La densidad aparente de la profundidad 30 cm a 90 cm del bosque de 10 años fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que en los bosques de 20 años y 40 años, entre los que no se observó diferencia significativa.

La densidad aparente del suelo se relacionó positivamente con el aumento de la profundidad del suelo, independientemente de la edad del bosque. Al cambio de esta variable con la profundidad del suelo se le ajustó un modelo de formato exponencial ($Y_i = a(Z)^b$). Los parámetros “ a ” y “ b ” del modelo no presentaron diferencias, y los coeficientes de determinación (R^2) fueron mayores a 0.65 en los bosques de 40 años y 10 años, mientras que, en el bosque de 20 años, el coeficiente de determinación fue menor a 0.6 (Tabla 1).

Tanto el porcentaje como el contenido de COS disminuyeron con la profundidad del suelo en los bosques de tres edades en estudio (Fig. 1b y Fig. c). El porcentaje de COS en los primeros 30 cm del suelo fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el bosque de 40 años que en los más jóvenes, mismos que presentaron porcentajes muy similares de COS en este espesor. En las capas comprendidas entre 30 cm a 60 cm, la concentración de COS fue similar ($p > 0.05$) entre rodales, independientemente de la edad. Sin embargo, el COS en la capa comprendida en 60 cm a 75 cm de los bosques más jóvenes (20 años y 10 años) fue significativamente menor que en el de 40 años. Finalmente, en el incremento 75 cm a 90 cm de profundidad la



concentración de COS en los bosques de 40 años y 10 años fue significativamente mayor ($p < 0.05$) que en el bosque de 20 años.

Los almacenes de COS (kg ha^{-1}) presentaron un patrón similar de distribución que el porcentaje de COS en los tres bosques, esto es, el C acumulado en cada incremento de profundidad disminuyó significativamente al incrementarse la profundidad (Fig. 1c) del perfil. Los almacenes de COS fueron significativamente superiores ($p < 0.05$) en el bosque de 40 años que en los rodales más jóvenes ($65.6 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 16.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ versus $55.3 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 9.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $56.2 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 10.0 \text{ Mg ha}^{-1}$). En los primeros 30 cm del perfil de suelo del bosque de 40 años se encontró más de la mitad del COS (62.5%) de todo el perfil. En los bosques de 20 años y 10 años el COS acumulado a esa profundidad fue 59.8% y 56.3% respectivamente.

El porcentaje de COS y la cantidad de COS asociado a la profundidad presentó una relación inversa, esto es, al aumentar la profundidad disminuyeron ambas variables, presentando un patrón similar. A estas variables se les ajustó un modelo de formato exponencial, en donde el valor del parámetro estadístico “ a ” aumentó conforme el bosque tenía mayor edad, lo que se relaciona con mayor porcentaje de COS y de cantidad de COS, mientras que el parámetro “ b ” fue mayor cuando el bosque era más joven, es decir, indica una disminución menor con la profundidad. El bosque de edad intermedia presentó el menor valor de este parámetro y, el de mayor edad, un valor intermedio. Los coeficientes de ajuste de las ecuaciones de los modelos exponenciales fueron mayores a 0.6 para la concentración de COS y cantidad de COS en los bosques de las tres edades en estudio (Tabla 1).

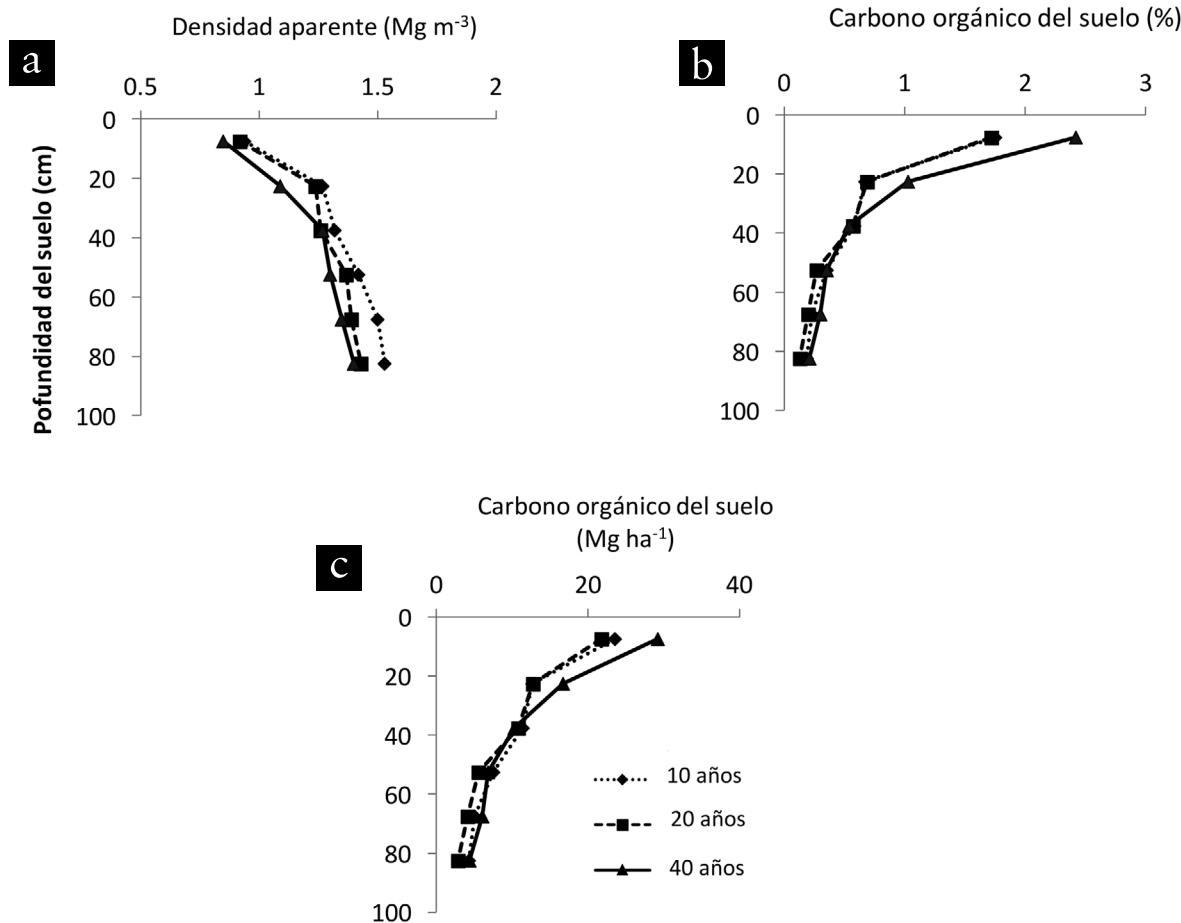


FIGURA 1. Distribución vertical de la Densidad aparente del suelo, contenido de carbono orgánico del suelo y los almacenes de carbono orgánico del suelo en tres diferentes edades de un bosque de encino en Morelos, México.

TABLA 1. Parámetros del suelo y modelos exponenciales ($Y = aZ^b$) en tres condiciones de edad de un bosque de encino en la Sierra de Huautla, Morelos, México.

Parámetro del suelo	Edad del bosque	Parámetros estadísticos			
		a	b	R^2	N
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	40 años	0.5382	0.2199	0.66	139
	20 años	0.6384	0.1849	0.54	158
	10 años	0.6107	0.2147	0.69	133
Contenido de COS (%)	40 años	15.134	-0.958	0.74	139
	20 años	13.056	-0.998	0.61	158
	10 años	10.44	-0.889	0.72	133
Almacenes de COS (Mg ha ⁻¹)	40 años	122.17	-0.738	0.68	139
	20 años	111.25	-0.774	0.64	158
	10 años	98.533	-0.682	0.64	133

N: número de muestras analizadas.

Distribución vertical de la biomasa de las raíces

La biomasa de raíces finas, en el incremento 0 cm a 90 cm del suelo, fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el bosque de 10 años ($6.9 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 0.2 \text{ Mg ha}^{-1}$) que en los bosques de 20 años y 40 años ($3.9 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 1.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $3.9 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 0.3 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). La biomasa de raíces finas se encontró concentrada en las capas superiores del perfil y disminuyó con la profundidad del suelo (Fig. 2). En la profundidad 0 cm a 15 cm del suelo de los bosques de 40 años, 20 años y 10 años se concentró 58.3%, 49.0% y 49.1% del total de estas, y en los primeros 30 cm la proporción fue de 80.9%, 69.7% y 79.8% del total, respectivamente.

La biomasa total asociada a las raíces gruesas y medianas presentes en la capa del suelo de 0 cm a 90 cm no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los bosques con edades de 10 años, 20 años y 40 años. Se observó, sin embargo, una ligera tendencia a aumentar conforme la edad del bosque era mayor. En los bosques de 10 años y

40 años esta alcanzó a $29.8 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 5.6 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $36.2 \text{ Mg ha}^{-1} \pm 6.4 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. El patrón de disminución de esta variable con la profundidad fue irregular, como se muestra en la figura 2b. En el bosque de 40 años se observó un decremento pronunciado en los primeros 45 cm, para luego presentar un incremento en la capa de 45 cm a 60 cm y posteriormente volver a disminuir. La biomasa de las raíces de este tamaño en el bosque de 20 años fue similar en las dos primeras capas (0 cm a 15 cm y 15 cm a 30 cm), para luego disminuir en las capas de 30 cm a 60 cm, con pequeñas variaciones entre 60 cm a 90 cm. En el bosque de menor edad, la biomasa de raíces de este grupo fue mayor en la capa de 15 cm a 30 cm que en la de 0 cm a 15 cm, para decrecer considerablemente en la capa de 30 cm a 45 cm de profundidad, moderando el decremento en las siguientes capas de 45 cm a 90 cm.

La proporción de la biomasa de las raíces gruesas y medianas en los primeros 15 cm, en contraste con la biomasa de las raíces finas, estuvo por debajo de 40% en los bos-



ques de 40 años, 20 años y 10 años (38.1%, 33.8% y 32.4%, respectivamente). En los primeros 30 cm, los bosques más jóvenes (20 años y 10 años) concentraron 76.2% y 76.6% de esas, respectivamente, valor que contrastó con el bosque de 40 años, que concentró 54.6% del total de la biomasa de raíces gruesas y medianas en esa profundidad.

Los modelos exponenciales ajustados para representar la distribución vertical de la biomasa de las raíces finas presentaron una tendencia similar en los bosques de las tres edades con valores del parámetro estadístico “*a*” que decrecían conforme aumentaba la edad del bosque. Los valores de los parámetros “*a*” y “*b*” se presentan en la tabla 2. Los coeficientes de determinación (R^2) del modelo de regresión de las raíces finas fueron 0.46, 0.32 y 0.58 para los bosques de 40 años, 20 años y 10 años, respectivamente. Dichos coeficientes de determinación se explican por la variabilidad de las raíces finas en el perfil del suelo

en cada bosque, la cual fue mayor para el bosque de 20 años, y por la probabilidad de pérdida de estas en el proceso de separación.

La tendencia la biomasa de raíces gruesas y medianas representada por el modelo de ajuste fue similar al de las raíces finas, pero con diferencias considerables en el parámetro “*a*”. El menor valor de “*a*” se obtuvo en el bosque de 20 años, y el mayor, en el de 10 años (Tabla 2). El parámetro “*b*”, por su parte, fue mayor en el bosque de mayor edad y el menor en el de 20 años. Los valores del coeficiente de determinación (R^2) para raíces gruesas y medianas fueron de 0.37, 0.62 y 0.61 en los bosques de 40 años, 20 años y 10 años, respectivamente. Los valores bajos del coeficiente de determinación (R^2), al igual que lo ocurrido con la biomasa de las raíces finas, se explican por la variabilidad dentro de cada condición del bosque, y fue mayor para el bosque de 40 años.

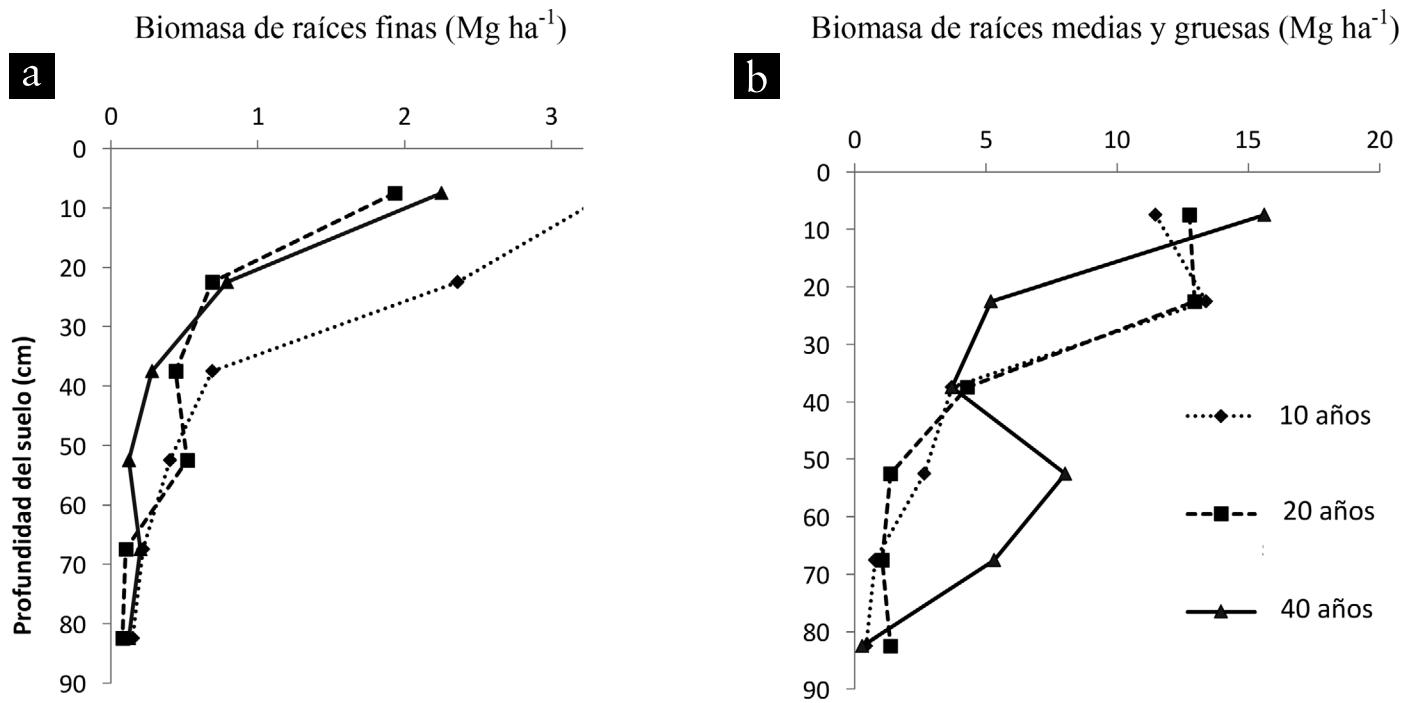


FIGURA 2. Distribución vertical de las raíces finas, medianas y gruesas en las tres diferentes condiciones de edad del bosque de encino en Morelos, México.

TABLA 2. Modelo exponencial para la biomasa de las raíces ($Y = aX^b$) en las tres condiciones de edad del bosque de encino de la Sierra de Huautla, Morelos, México.

<i>Biomasa de las raíces</i> <i>Mg ha⁻¹</i>	<i>Edad del bosque</i>	<i>Parámetros estadísticos</i>			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R²</i>	<i>N</i>
Raíces finas	40 años	51.939	-1.658	0.46	139
	20 años	57.789	-1.784	0.32	158
	10 años	65.053	-1.431	0.58	133
Raíces medias y gruesas	40 años	125.16	-1.071	0.37	16
	20 años	49.717	-1.269	0.62	18
	10 años	171.84	-1.119	0.61	12

N: número de muestras analizadas.

Relación de la biomasa de las raíces finas, medias y gruesas con parámetros del suelo

La relación de la biomasa de las raíces finas con la densidad aparente mostró una correspondencia inversa; la ordenada al origen y la pendiente tuvieron alto nivel de significancia ($p < 0.001$) en el caso de todos los bosques, independientemente de la edad de estos, aunque los valores del coeficiente de determinación (R^2) fueron menores de 0.4 (Tabla 3). Estos bajos valores son consecuencia de la gran dispersión de los datos, un fenómeno común en estudios con raíces. La biomasa de las raíces finas mostró una relación positiva con el COS; las pendientes de los modelos tuvieron altos niveles de significancia, independientemente de la edad de los bosques ($p < 0.001$). Sin embargo, el valor de la ordenada al origen de los modelos solo presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en el caso de los bosques de 10 años y 20 años; los coeficientes de determinación (R^2) fueron bajos (0.4-0.5).

La biomasa de las raíces gruesas y medias también se asoció inversamente con la densidad aparente, las inter-

secciones de los modelos con la ordenada al origen tuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$). Cuando se estableció la relación de estas con la pendiente se observó que las diferencias eran significativas ($p < 0.05$) solo en el caso de los más jóvenes. Como ocurrió con las raíces finas, los coeficientes de determinación (R^2) fueron bajos, por la dispersión natural de los datos registrados. Al relacionar la biomasa de las raíces gruesas y medias con el COS, la ordenada al origen de los modelos fue estadísticamente igual y la pendiente presentó diferencias significativas ($p < 0.05$), solo en el caso de los bosques de 40 años y 20 años, pero los coeficientes de determinación (R^2) fueron bajos.

Los modelos que resultaron de asociar el porcentaje de COS con la densidad aparente mostraron un vínculo negativo entre estas dos variables y tanto la ordenada al origen como la pendiente mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$), en tanto que los coeficientes de determinación (R^2) tuvieron valores mayores de 0.60 en las tres edades estudiadas.



TABLA 3. Modelos lineales para la relación de la biomasa de las raíces con la densidad aparente (Da), contenido de COS (%) y la relación de la Da con el contenido del COS (%) en las tres condiciones de edad del bosque de encino de la Sierra de Huautla, Morelos, México.

Modelo	Edad del Bosque	Parámetros estadísticos					
		β_0	p	β_1	p	R^2	Gl
BRF vs Da	40 años	4.179	<0.001	-2.948	<0.001	0.24	138
	20 años	3.835	<0.001	-2.606	<0.001	0.33	157
	10 años	6.307	<0.001	-3.936	<0.001	0.36	132
BRF vs COS	40 años	-0.069	0.630	0.0606	<0.001	0.31	138
	20 años	-0.217	0.037	0.082	<0.001	0.37	157
	10 años	-0.364	0.041	0.134	<0.001	0.50	132
BRMG vs Da	40 años	30.85	0.022	-20.36	0.061	0.23	15
	20 años	38.556	<0.001	-26.232	0.001	0.48	17
	10 años	28.587	0.007	-16.765	0.029	0.39	11
BRMG vs COS	40 años	0.47	0.867	0.496	0.010	0.39	15
	20 años	-0.965	0.672	0.695	0.002	0.45	17
	10 años	2.182	0.556	0.3837	0.130	0.21	11
Da vs COS	40 años	1.318	<0.001	-0.167	<0.001	0.61	138
	20 años	1.401	<0.001	-0.253	<0.001	0.65	157
	10 años	1.504	<0.001	-0.303	<0.001	0.72	132

BRF: Biomasa de raíces finas; BRMG: Biomasa de raíces medianas y gruesas; Da: Densidad aparente del suelo; COS: Carbono orgánico del suelo; β_0 : Ordenada al origen; β_1 : Pendiente; p: valor de p para las diferencias significativas; Gl: grados de libertad.

DISCUSIÓN

Densidad aparente del suelo y carbono orgánico del suelo

Como se indicó en los resultados, la densidad aparente del suelo incrementó con la profundidad y se relacionó inversamente con la cantidad del COS y con la biomasa de raíces. Dicho incremento es un patrón común en los

ecosistemas forestales, ya que a mayor profundidad disminuye la formación de agregados asociados a la materia orgánica (Huntington, Johnson, Johnson, Siccama y Ryan, 1989). También disminuye la bioturbación provocada por animales (pequeños mamíferos, lombrices de tierra, etc.) y el desarrollo de raíces (Paz y Etchevers, 2016). Contrariamente, aumenta la presión estática en la profundidad del perfil, lo que conlleva a una disminución del

espacio poroso y al incremento de la densidad aparente (Don, Schumacher, Scherer, Scholten y Schulze, 2007). Generalmente, a mayor profundidad se tiene un menor desarrollo del suelo por los agentes del intemperismo, y por ello, una mayor densidad aparente (Lal y Kimble, 2001).

Para medir los almacenes de COS se precisa estimar la concentración de COS y la densidad aparente. La concentración de COS se relaciona con los procesos bióticos, tales como producción de biomasa, descomposición, deposición de residuos vegetales en la superficie del suelo y aporte al suelo de residuos cuando mueren las raíces (Don *et al.*, 2007; Goberna, Sánchez, Pascual y García, 2006) que van disminuyendo con la profundidad. Consecuentemente, la concentración de COS decrece con el incremento de la profundidad, tal como se observó en los bosques de encino con edades de 10 años a 40 años. Tal disminución es de carácter exponencial. Aunque el tipo de vegetación, clima y textura del suelo son los principales controles regionales de la cantidad total de COS, su distribución vertical está asociada principalmente con el efecto de la vegetación (Jobbágy y Jackson, 2000). La producción de materia orgánica por las plantas y la descomposición de sus residuos determinan las adiciones de C al suelo, pero la distribución aérea y subterránea de la biomasa influye en la distribución relativa del COS en el perfil (Cairns, Brown, Helmer y Baumgardner, 1997).

En el presente estudio, la cantidad de COS fue considerablemente menor al promedio de 174 Mg ha⁻¹ que observaron Jobbágy y Jackson (2000) para bosques templados caducifolios del mundo. Esta diferencia puede explicarse por la dinámica del aporte de C, que es función de la tasa de adición de los residuos orgánicos y de su mineralización, producto a su vez de las interacciones de la planta con las condiciones ambientales. Como el estrés hídrico en la zona no es severo, y los árboles solo pierden una proporción de las hojas, la entrada de C al sistema no es abundante, en tanto que la actividad de los microorganismos descomponedores de la materia orgánica puede continuar por períodos prolongados. Lo anterior aunado a las condiciones de temperatura media (superiores a los

17 °C en todo el año) hace que la descomposición de la materia orgánica sea de moderada a elevada (Jobbágy y Jackson, 2000), dejando pocos residuos transformados en el suelo. Un aspecto poco estudiado es la influencia de la composición bioquímica de las hojas en las tasas de descomposición, como lo hicieron Jasso y colaboradores (2020).

El bosque de mayor edad presentó los mayores contenidos de COS y las gradientes más pronunciadas de disminución de este con la profundidad. La proporción de COS presente en los primeros 30 cm, en los tres bosques de encino estudiados, fue de 60% del total del perfil, cercana a la obtenida por Jobbágy y Jackson (2000) para bosques templados caducifolios. Ello se explica porque residuos vegetales frescos y exudados del sistema denso de raíces y también de los residuos de las raíces finas que mueren cada año, proveen de C fresco a la capa superior del suelo (Goberna *et al.*, 2006). La diferencia en la cantidad de residuos entre los bosques se explica porque a medida que aumenta la edad estos disminuyen. Por ejemplo, en el bosque de 40 años, donde hay mayor densidad del dosel, es más cerrado, hay pocas herbáceas en el sotobosque y menor biomasa de raíces finas. La mayor contribución de materia orgánica al suelo proviene de hojas y material leñoso que cae de los árboles y se acumula y luego parte de este es descompuesto en la superficie del suelo. Otra parte es transformada por la mesofauna e incorporada al suelo, principalmente en las capas superficiales, y ahí descompuesta por los microorganismos. En contraste, el bosque de 10 años tiene un dosel más abierto, y aunque su aporte de hojas es menor, presenta abundancia de herbáceas y mayor cantidad de biomasa de raíces finas, cuya descomposición contribuye a la acumulación de la materia orgánica en el suelo a mayor profundidad (Fig. 1 b).

Para caracterizar matemáticamente la distribución del COS con la profundidad del suelo, algunos investigadores agrupan sus mediciones en incrementos fijos de profundidad (Omonode y Vyn, 2006; Slobodian, Van Rees y Pennock, 2002), mientras otros ajustan funciones continuas, siendo la exponencial la más usada (Bernoux, Arrouays, Cerri y Bourennane, 1998; Meersmans *et al.*,



2009; Sleutel, De Neve y Hofman, 2003). En otros estudios, la distribución del COS con la profundidad es descrita por funciones logarítmicas (Jobbágy y Jackson, 2000) o polinomiales (Arrouays y Pélassier, 1994). En este estudio se seleccionó la función exponencial por generar los coeficientes de determinación mayores.

Biomasa de raíces finas, medias y gruesas

La cantidad de biomasa de raíces finas varía en función de las características estructurales del bosque como son: especies, edad, densidad, área basal de los árboles, propiedades del suelo y factores ambientales como temperatura, precipitación, localización geográfica y elevación (Cairns *et al.*, 1997; Chen, Eamus y Hustley, 2004; Finér *et al.*, 2011; Leuschner y Hertel, 2002). La biomasa de raíces finas recuperada en este estudio es similar a la documentada para bosques de *Quercus* spp. Por ejemplo, Claus y George (2005) extrajeron en un sitio en el norte de Italia de 2.17 Mg ha⁻¹ a 3.98 Mg ha⁻¹, mientras que Joslin y Henderson (1987) reportaron haber recolectado 2.98 Mg ha⁻¹ en un rodal de *Quercus* en Missouri (Finér *et al.*, 2011) entre 3.6 Mg ha⁻¹ y 4.8 Mg ha⁻¹ en bosques templados de hoja ancha y de 4.1 Mg ha⁻¹ a 4.8 Mg ha⁻¹ en especies tropicales de hojas anchas. En general, en el sitio de estudio las condiciones de fertilidad del suelo y disponibilidad de humedad se consideró que eran adecuadas. Se ha observado (Finér *et al.*, 2011; Helmisaari, Derome, Nöjd y Kukkola, 2007) que la biomasa de raíces finas es menor cuando la disponibilidad de nutrientes es alta, pero que aumenta cuando la disponibilidad de agua es mayor (Meier y Leuschner, 2008; Powers, Treseder y Lerdau, 2005).

A medida que la edad del bosque era mayor, la cantidad de biomasa de raíces finas iba siguiendo el patrón descrito por Claus y George (2005), quienes registraron un rápido incremento en estas al inicio de la regeneración del bosque o plantación, alcanzando un valor máximo cuando se cierra el dosel, seguido de un decremento durante la etapa de maduración, llegando a un equilibrio al alcanzar esta última. Estudios conducidos en diferentes ecosistemas forestales confirman el patrón arriba señala-

lado (Bouillet *et al.*, 2002; Claus y George, 2005; Mund, Kummetz, Hein, Bauer y Schulze, 2002). Todas estas observaciones sugieren que existe una relación entre la biomasa de raíces finas y la producción de biomasa aérea, y de esta con el desarrollo del área foliar, que, si bien no se midió, se observó que incrementaba con la edad de los árboles.

La distribución vertical de las raíces finas registrada en este estudio coincide con el patrón identificado: esto es, mayor abundancia en las capas superficiales y decrecimiento con el incremento en la profundidad, como lo han informado la mayoría de quienes investigan este tema (Chen, Han, Wang y Wang, 2006; Claus y George, 2005; Fujimaki, Tateno, Hirobe, Tokuchi y Takeda, 2004; Hodge, 2004; Schenk y Jackson, 2005). El porcentaje de las raíces finas en los primeros 30 cm, con respecto al total en los 90 cm estudiados, fue aproximadamente 70%, valor consistente con los publicados en otros trabajos (Chen *et al.*, 2004; Yanai, Park y Hamburg, 2006).

Schenk y Jackson (2002) señalan en su revisión que, en promedio, 95% de las raíces finas se encuentran en los primeros 58 cm en un bosque boreal, entre 91 cm y 94 cm en un bosque tropical y entre 104 cm y 121 cm en un bosque templado. Mientras que 50% de ellas se ubicaría en los intervalos 0 cm - 12 cm, 21 cm - 23 cm y 14 cm - 16 cm, de los bosques anteriormente señalados, respectivamente. En el presente estudio, conducido en un bosque de *Quercus*, ubicado en una zona subtropical con clima semicálido, se encontró que la proporción de la biomasa de raíces finas en los primeros 30 cm del suelo, fue 80.9%, 69.7% y 79.8% para los bosques de 40 años, 20 años y 10 años, respectivamente, valor cercano a los arriba señalados.

De acuerdo con lo estimado por Jackson *et al.* (1996), la distribución de las raíces, incluidas las gruesas, medias y finas, en promedio global para todos los ecosistemas forestales es de aproximadamente 30%, 50% y 75% de raíces en los primeros 10 cm, 20 cm, y 40 cm, respectivamente. En el presente estudio se encontraron valores congruentes con los anteriores, ya que en los primeros 15 cm del bosque de *Quercus* de 40 años, 20 años y 10 años de edad se estimó que había 41.9%, 37.5% y 39.6% de las raíces finas, y que

en los primeros 30 cm la proporción de todo tipo de raíces fue de 56.9%, 75.5% y 77.2%, respectivamente.

Varios estudios (Fujimaki *et al.*, 2004; Hodge, 2004) han mostrado que la distribución de las raíces finas en el perfil del suelo está relacionada con las características físicas y químicas de este. El rol que desempeñan las raíces finas en la absorción de nutrientes y agua es que una menor proporción de estas en el suelo se asocia, en la mayoría de los ecosistemas forestales, con baja fertilidad, materia orgánica y abastecimiento de N (Chen *et al.*, 2004; Claus y George, 2005). La cantidad de raíces finas presentan cambios temporales en el primer metro de espesor del suelo, asociados a la disponibilidad de humedad; los cambios son extremos en el caso de las raíces finas, particularmente durante el inicio de la estación seca, pero ocurre un repunte muy marcado al inicio de la estación húmeda (Chen *et al.*, 2004; Janos, Scott y Bowman, 2008). El muestreo de raíces en este estudio se realizó en la estación húmeda (julio-agosto), por lo que se espera que los valores estimados de biomasa de las raíces estén cercanos al valor máximo, dado que las lluvias se habían establecido 5 a 6 semanas antes del muestreo.

Varios estudios documentan que la biomasa de las raíces gruesas y medias tiene una correlación cercana con el diámetro de los tallos de los árboles (Finér *et al.*, 2011; Vadeboncoeur, Hamburg y Yanai, 2007; Yanai *et al.*, 2006); en nuestro estudio se presentó dicha tendencia, pero no hubo diferencia significativa entre los bosques con diferente edad.

Relación entre la biomasa de las raíces y los parámetros del suelo

En los bosques de *Quercus* de 40 años, 20 años y 10 años, las raíces finas se distribuyeron más someramente que el COS, con porcentajes con respecto al total del perfil, en los primeros 15 cm, de 58.3%, 49.0% y 49.1%, respectivamente, en tanto que el porcentaje del total del COS en esa capa fue 39.7%, 37.7% y 36.6%, respectivamente. En los primeros 30 cm los porcentajes de raíces finas fueron 78.8%, 66.5% y 83.1% y los de COS 62.5%, 59.8% y 56.3% en los bosques de la edad indicada, respectiva-

mente. Este patrón de distribución vertical de las raíces finas ha sido descrito en varios trabajos atribuyéndose el decremento del COS con la profundidad (Daly *et al.*, 2000; Trumbore, 2000). Los cambios en la calidad de los tejidos de las raíces con la profundidad, asociado a las estructuras radicales leñosas que se encuentran en las capas más profundas, así como la menor concentración de nutrientes en estas últimas, pueden contribuir al patrón observado (Gordon y Jackson, 2000). Fontaine *et al.* (2007) estipulan que la principal causa de las tasas reducidas de descomposición en las capas más profundas de este es la falta de C orgánico fresco que restringe la disponibilidad de energía para los microorganismos.

Además del decremento de la biomasa de las raíces finas con la profundidad del suelo, la relación inversa de estas con la densidad aparente se asocia al aumento de la resistencia del suelo con el aumento de esta con la profundidad (Bingham y Bengough, 2003). En estas condiciones, la elongación y la masa de las raíces finas decrecen al incrementarse la resistencia del suelo (Zhou y Shangguan, 2007).

La densidad aparente se correlacionó negativamente con el COS, coincidiendo con los resultados obtenidos por otros investigadores (Crowe, McClean y Cresser, 2006; Don *et al.*, 2007). La ordenada al origen y la pendiente de los modelos ajustados fueron significativamente diferentes, lo que indica que hay una relación de la edad de los bosques con la cantidad de COS acumulada en el suelo. Los coeficientes de determinación de estas relaciones fueron mayores a 0.60, lo cual es coincidente lo señalado por trabajos que relacionan la densidad aparente el COS (Crowe *et al.*, 2006; Don *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

La concentración de carbono orgánico del suelo (COS) y los almacenes de dicho elemento presentaron un patrón de distribución con tendencia decreciente al aumentar la profundidad del suelo en los tres estados sucesionales (10 años, 20 años y 40 años) de un bosque predominante de *Quercus*. El patrón de cambio de la densidad aparente con la profundidad del perfil indica que esta característica



incrementa con la profundidad en ese suelo boscoso. Más de la mitad del carbono almacenado en el suelo (0 cm a 90 cm) se encontró en los primeros 30 cm de este, independientemente de edad del bosque. La biomasa de raíces finas disminuyó de manera exponencial con la profundidad, mientras que la biomasa de las raíces medias y gruesas tuvo un patrón irregular. En las tres condiciones del bosque la biomasa de las raíces finas, medias y gruesas se correlacionó más estrechamente con la densidad aparente que con el carbono acumulado en el suelo. El contenido de COS se relacionó linealmente con la densidad aparente del suelo.

REFERENCIAS

- Arrouays, D., & Pélassier, P. (1994). Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, 157, 185-192.
- Bandaranayake, W., Qian, Y. L., Parton, W. J., Ojima, D. S., & Follett, R. F. (2003). Estimation of soil organic carbon changes in Turfgrass systems using the CENTURY Model. *Agronomy Journal*, 95(3), 558-563. doi: 10.2134/agronj2003.5580
- Beets, P. N., Oliver, G.R., & Clinton, P.W. (2002). Soil carbon protection in podocarp/hardwood forest, and the effects of conversion to pasture and exotic pine forest. *Environmental Pollution*, 166, 563-573. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00248-2
- Bernoux, M., Arrouays, D., Cerri, C., & Bourennane, H. (1998). Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian Amazon (Rondonia). *Soil Science*, 163(12), 941-951.
- Bingham, I. J., & Bengough, A. G. (2003). Morphological plasticity of wheat and barley roots in response to spatial variation in soil strength. *Plant and Soil*, 250, 273-282. doi: 10.1023/A:1022891519039
- Bouillet, J. P., Laclau, J. P., Arnaud, M., M'Bou, A. T., Saint-André, L., & Jourdan, C. (2002). Changes with age in the spatial distribution of roots of *Eucalyptus* clone in Congo: Impact on water and nutrient uptake. *Forest Ecology and Management*, 171(1-2), 43-57. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00460-7
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11. doi: 10.1007/s004420050201
- Challenger, A. (1998). Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio. 847pp.
- Chen, X., Eamus, D., & Hutley, L. B. (2004). Seasonal patterns of fine-root productivity and turnover in a tropical savanna of northern Australia. *Journal of Tropical Ecology*, 20(2), 221-224. doi: 10.1017/S0266467403001135
- Cheng, Y., Han, Y., Wang, Q., & Wang, Z. (2006). Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelinii* plantation. *Frontiers of Biology in China*, 1(3), 310-317. doi: 10.1007/s11515-006-0039-2
- Claus, A., & George, E. (2005). Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(7), 1617-1625. doi: 10.1139/x05-079
- Crowe, A. M., McClean, C. J., & Cresser, M. S. (2006). An application of genetic algorithms to the robust estimation of soil organic and mineral fraction densities. *Environmental Modelling & Software*, 21(10), 1503-1507. doi: 10.1016/j.envsoft.2006.03.001
- Daly, C., Bachelet, D., Lenihan, J. M., Neilson, R. P., Parton, W., & Ojima, D. (2000). Dynamic simulation of tree-grass interactions for global change studies. *Ecological Applications*, 10(2), 449-469. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0449:DSOTGI]2.0.CO;2
- Don, A., Schumacher, J., Scherer L., M., Scholten, T., & Schulze, E. D. (2007). Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites-Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 141(3-4), 272-282. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.06.003
- Etchevers, J. D., Monreal, B. C., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., & López, R. M. (2005). Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de postgraduados, Montecillo, México. 29 pp

- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & Hirano, Y. (2011). Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 261(2), 265–277. doi: 10.1016/j.foreco.2010.10.016
- Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., Bdioui, N., Mary, B., & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450, 277–280. doi: 10.1038/nature06275
- Fujimaki, R., Tateno, R., Hirobe, M., Tokuchi, N., & Takeda, H. (2004). Fine root mass in relation to soil N supply in a cool temperate forest. *Ecological Research*, 19(5), 559–562. doi: 10.1111/j.1440-1703.2004.00669.x
- Gal, A., Vyn, T.J., Micheli, E., Kladivko, E.J., & McFee, W.W. (2007). Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil & Tillage Research*, 96(1-2), 42–51. doi: 10.1016/j.still.2007.02.007
- Gill, R. A., & Jackson, R. B. (2000). Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist Foundation*, 147(1), 13–31. doi: 10.1046/j.1469-8137.2000.00681.x
- Goberna., M., Sánchez, J., Pascual, J. A., & García, C. (2006). Surface and subsurface organic carbon, microbial biomass and activity in a forest soil sequence. *Soil Biology & Biochemistry*, 38(8), 2233–2243. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.02.003
- Gómez, J. D. (2008). Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la reserva de la biosfera “Sierra de Huautla”, Morelos, México. PhD Thesis, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 194 pp.
- Gordon, W. S., & Jackson, R. B. (2000). Nutrient concentrations in fine roots. *Ecology*, 81(1), 275-280. doi: 10.1890/0012-9658(2000)081[0275:NCIFR]2.0.CO;2
- Grace, J. (2004). Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology*, 92(2), 189–202. doi: 10.1111/j.0022-0477.2004.00874.x
- Helmsaari, H. S., Derome, J., Nöjd, P., & Kukkola, M. (2007). Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. *Tree Physiology*, 27(10), 1493–1504. doi: 10.1093/treephys/27.10.1493
- Hodge, A. (2004). The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytol*, 162, 9–24. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01015.x
- Huntington T. G., Johnson, C. E. Johnson, A. H., Sicama, T. G., Ryan, D. F. (1989). Relationship between soil organic carbon and bulk density relationships in a forested spodosol. *Soil Science*, 148, 380-386.
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 389-411. doi: 10.1007/BF00333714
- Janos, D. P., Scott, J., & Bowman, D. M. (2008). Temporal and spatial variation of fine roots in a northern Australian *Eucalyptus tetrodonta* savanna. *Journal of Tropical Ecology*, 24, 177–188. doi: 10.1017/S0266467408004860
- Janzen, H., (2004). Carbon cycling in earth systems: a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 399–417. doi: 10.1016/j.agee.2004.01.040
- Jasso F. I., Galicia, L., Chávez-Vergara, B., Merino, A., Tapiá-Torres, Y., & García-Oliva, F. (2020). Soil organic matter dynamics and microbial metabolism along an altitudinal gradient in Highland tropical forest. *Science of the Total Environment*, 741, 140143. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140143
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10(2), 423-436. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2
- Joslin, J. D., & Henderson, G. S. (1987). Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. *Forest Science*, 33(2), 330–346. doi: 10.1093/forestscience/33.2.330
- Lal, R., & Kimble, J. M. (2001). Importance of soil bulk density and methods of its importance. In: Lal, R., Kimble, J. M., Follett, R. F., Stewart, B. A. (Eds.), *Assessment methods for soil carbon*. Lewis Publishers, London, pp. 31–44.
- Leuschner, C., & Hertel, D. (2002). Fine root biomass of temperate forests in relation to soil acidity and fertility, climate, age and species. In: Esser K., Lüttge U., Beyschlag W., Hellwig F. (eds). *Progress in Botany*, 64, (pp. 40-438).



- Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-55819-1_16
- Meier, I. C., & Leuschner, C. (2008). Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient. *Global Change Biology*, 14(9), 2081-2095. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01634.x
- Meersmans, J., van Wesemael, B., De Ridder, F., & Van Molle, M. (2009). Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma*, 152(1-2), 43-52. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.05.015
- Mund, M., Kummetz, E., Hein, M., Bauer, G. A., & Schulze, E. D. (2002). Growth and carbon stock of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management*, 171(3), 275-296. doi: 10.1016/S0378-1127(01)00788-5
- Oliver, G. R., Beets, P. N., Garrett, L. G., Pearce, S. H., Kimberly, M. O., Ford-Robertson, J. B., & Robertson, K. A. (2004). Variation in soil carbon in pine plantations and implications for monitoring soil carbon stocks in relation to land-use change and forest site management in New Zealand. *Forest Ecology and Management*, 203(1-3), 283-295. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.045
- Omonode, R. A., & Vyn, T. J. (2006). Vertical distribution of soil organic carbon and nitrogen under warm-season native grasses relative to croplands in west-central Indiana, USA. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 117(2-3), 159-170. doi: 10.1016/j.agee.2006.03.031
- Pattison, A. B., Moody, P. W., Badcock, K. A., Smith, L. J., Armour, J. A., Rasiah, V., Cobon, J. A., Gulino, L.-M., & Mayer, R. (2008). Development of key soil health indicators for the Australian banana industry. *Applied Soil Ecology*, 40(1), 155-164. doi: 10.1016/j.apsoil.2008.04.002
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532, 49-57. doi: 10.1038/nature17174. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Paz, F. y Etchevers, J. (2016). Distribución a profundidad del carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 339-355.
- Powers, J. S., Treseder, K. K., & Lerdau, M. T. (2005). Fine roots, arbuscular mycorrhizal hyphae and soil nutrients in four neotropical rain forests: patterns across large geographic distances. *New Phytologist*, 165(3), 913-921. doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01279.x
- SAS. (2004). Statistical Analysis System, Version 9. SAS Institute, Cary, NC
- Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2002). The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 72(3), 311-328. doi: 10.1890/0012-9615(2002)072[0311:TGBOR]2.0.CO;2
- Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2005). Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma*, 126(1-2), 129-140. doi: 10.1016/j.geoderma.2004.11.018
- Sleutel, S., De Neve, S., & Hofman, G. (2003). Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland. *Soil Use and Management*, 19(2), 166-171. doi: 10.1111/j.1475-2743.2003.tb00299.x
- Slobodian, N., Van Rees, K., & Pennock, D. (2002). Cultivation-induced effects on belowground biomass and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal* 66 (3), 924-930. doi: 10.2136/sssaj2002.9240
- Trumbore, S. (2000). Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. *Ecological Applications*, 10(2), 399-411. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0399:AOSOMA]2.0.CO;2
- Vadeboncoeur, M. V., Hamburg, S. P., & Yanai, R. D. (2007). Validation and refinement of allometric equations for roots of northern hardwoods. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9), 1-7. doi: 10.1139/X07-032
- Yanai, R. D., Park, B. B., & Hamburg, S. P. (2006). The vertical and horizontal distribution of roots in northern hardwood stands of varying age. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(2), 450-459. doi: 10.1139/x05-254
- Zhou, Z., & Shangguan, Z. (2007). Vertical distribution of fine root in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant and Soil*, 291, 119-129. doi: 10.1007/s11104-006-9179-z

Manuscrito recibido el 17 de septiembre de 2020

Aceptado el 25 de junio de 2021

Publicado el 02 de diciembre de 2021

Este documento se debe citar como:

Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Campo, J., Paustian, K., & Asensio, C. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742445. doi: 10.21829/myb.2021.2742445



Madera y Bosques, por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.