

ESTIMACIÓN DE LOS ALMACENES DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO EN TRES TIPOS DE BOSQUE TEMPLADO EN DURANGO, MÉXICO

ESTIMATING SOIL ORGANIC CARBON STOCKS IN THREE TEMPERATE FOREST TYPES IN DURANGO, MEXICO

BENEDICTO VARGAS-LARRETA^{1*}, MAYRA AMEZCUA ROJAS², JORGE OMAR LÓPEZ-MARTÍNEZ^{3,4}, JOSÉ ANTONIO CUETO-WONG⁵, FRANCISCO CRUZ-COBOS¹, JUAN ABEL NÁJERA-LUNA¹, CRISTÓBAL GERARDO AGUIRRE-CALDERÓN¹

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, El Salto, Durango, México.

² Programa de Maestría en Ingeniería Forestal. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, El Salto, Durango, México.

³ Cátedra, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

⁴ Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente Agroecología, El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, México.

⁵ Campo Experimental La Laguna, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.

*Author for correspondence: bvargas@itelsalto.edu.mx

Resumen

Antecedentes: Los almacenes de carbono (C) de los bosques del mundo ascienden a 861 Pg; 44 % se encuentra en el suelo. A pesar de su importancia como reservorio, los estudios sobre carbono orgánico en el suelo (COS) en los bosques de México son escasos.

Pregunta: ¿El carbono orgánico en el suelo varía entre tipos de vegetación y tipos de suelo en los bosques de Durango?

Sitio de estudio: Bosques templados de Durango, México.

Métodos: Los datos de COS se obtuvieron de 399 sitios permanentes. Se colectaron muestras de hojarasca, horizonte de fermentación y de las capas de suelo de 0-30 y 30-60 cm. Los contenidos de C se determinaron en un analizador elemental. El cálculo de las incertidumbres se realizó siguiendo los procedimientos usados por la Comisión Nacional Forestal.

Resultados: El COS promedio estimado fue 8.48, 1.08, 110.62 y 53.44 Mg ha⁻¹ en hojarasca, horizonte de fermentación, suelo de 0-30 y de 30-60 cm, respectivamente. Los almacenes promedio de C total en el suelo oscilaron desde 26.34 hasta 578.27 Mg ha⁻¹ (incertidumbre: 6.31 %). La mayor variabilidad de los almacenes de COS se presentó en el bosque de pino.

Conclusiones: El tipo de bosque no influye en los almacenes de carbono orgánico en el suelo, pero sí el tipo de suelo. Los reservorios de COS en los bosques Durango son más altos comparados con el mismo tipo de vegetación en otras regiones del país.

Palabras claves: COS, hojarasca, horizonte de fermentación, GEI, reservorio de carbono.

Abstract

Background: Carbon (C) stocks in the world's forests amount to 861 Pg; 44 % is in the soil. Despite its importance as a reservoir, studies on soil organic carbon (SOC) in forests of Mexico are scarce.

Questions: Does soil organic carbon vary between vegetation types and soil types in Durango forests?

Study site: Temperate forests of Durango, Mexico.

Methods: SOC data were obtained from 399 permanent sites. Samples were collected from leaf litter, fermentation horizon and from the 0-30 and 30-60 cm soil layers. C contents were determined on an elemental analyzer. Uncertainties were calculated following the procedures used by the National Forestry Commission.

Results: The average SOC was 8.48, 1.08, 110.62 and 53.44 Mg ha⁻¹ in litter, fermentation horizon, 0-30 and 30-60 cm soil, respectively. The average total soil C stocks ranged from 26.34 to 578.27 Mg ha⁻¹ (uncertainty: 6.31 %). The greatest variability of SOC stocks occurred in pine forest.

Conclusions: Forest type does not influence soil organic carbon pools, but soil type does. SOC pools in Durango forests are higher compared to the same type of vegetation in other regions of the country.

Key words: SOC, litterfall, fermentation horizon, GHG, carbon pool.

El carbono orgánico regula las funciones físicas, químicas y biológicas del suelo para mantener su fertilidad y productividad (Pan *et al.* 2009, Cai *et al.* 2016). Es un insumo fundamental para monitorear el ciclo del carbono bajo escenarios de cambio de uso de la tierra, por lo que los suelos se consideran un componente básico en el control del cambio climático (Kirschbaum 2000), ya que en función de su uso pueden convertirse en fuentes o sumideros de carbono atmosférico (Lal 2004).

Durante las últimas siete décadas se han reportado diversas estimaciones de las reservas mundiales de carbono orgánico en el suelo (COS) (Eswaran *et al.* 1993, Batjes 1996, Davidson *et al.* 2000, Bell & Worrall 2009), y aunque la mayoría de los estudios reportan una estimación global promedio cercana a 1,500 PgC, existe una variación considerable (rango 504-3,000 Pg C; Scharlemann *et al.* 2014).

Segura-Castruita *et al.* (2005) mencionan que muchos de los estudios a nivel mundial, nacional y regional sobre contenido de C, se basan en mapas de suelo, lo que conlleva grandes incertidumbres. Bohn (1976) reportó un almacén global de $2,946 \pm 500$ Pg basado en los mapas de suelo de la FAO. Posteriormente, Bohn (1982) usó 187 perfiles a 1 m de profundidad para estimar un almacén de COS total de 2,207 Pg C, mientras que Batjes (1996) utilizó 5,353 perfiles de suelo del Inventario Mundial de Emisiones Potenciales de Suelos (WISE, por sus siglas en inglés), con los cuales fijó las existencias de carbono total promedio en 1,500 Pg (rango 1,462-1,548 Pg) en el primer metro de suelo, las cuales son similares a las estimaciones reportadas por Eswaran *et al.* (1993) quienes utilizaron datos de 16,000 sitios de suelos de Estados Unidos.

Etchevers *et al.* (2006) realizaron la primera aproximación de los almacenes de C en suelos superficiales de México, en la cual aportan una idea preliminar de la cantidad de COS en los suelos y su distribución en la república mexicana. El primer reporte formal sobre almacenes de COS para México estimó 7.1 Gt (Halldorsson *et al.* 2013), mientras que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo menciona que la incertidumbre de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de los valores de COS disponibles en México es de 68 %.

A pesar de la atención prestada al COS en los últimos años, en México son pocos los estudios sobre contenido de C en suelos (Segura-Castruita *et al.* 2005), cambios en los almacenes y detección de puntos vulnerables de pérdidas y ganancias del carbono del suelo, por lo que la información del C en este reservorio es limitada o inexistente para muchas regiones del país. El conocimiento actualizado de los almacenes de COS en México es esencial para un mejor manejo del C global y el desarrollo de estrategias nacionales de mitigación al cambio climático.

Durango es la primera reserva nacional forestal y ocupa los primeros lugares en biodiversidad. Tiene una situación geográfica privilegiada, ya que casi todos los tipos de vegetación existentes en el país, a excepción de las selvas o bosques tropicales perennifolios, se encuentran en el Estado (González-Elizondo *et al.* 2012). Por estas características, la entidad ha sido identificada en las Comunicaciones Nacionales como altamente vulnerable a la variabilidad del clima, especialmente los ecosistemas principales como el bosque de coníferas en la zona de la Sierra. Por lo anterior, contar con una línea base del COS por tipo de vegetación y tipo de suelo, ayudará a disminuir la incertidumbre asociada a este importante almacén de carbono y contribuir al conocimiento del ciclo global del carbono en los ecosistemas forestales.

En este contexto, los objetivos de este estudio fueron i) calcular la línea base del carbono orgánico en el suelo de los bosques de Durango y ii) comparar los almacenes de carbono entre tipos de vegetación y tipos de suelo. Para alcanzar los objetivos anteriores se planteó la siguiente pregunta: ¿El carbono orgánico en el suelo varía entre tipos de vegetación y tipos de suelo en los bosques de Durango?

Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se realizó en los bosques templados de Durango, México ($22^{\circ} 20' 49''$ a $26^{\circ} 46' 33''$ N; $103^{\circ} 46' 38''$ a $107^{\circ} 11' 36''$ O) (Figura 1). La elevación sobre el nivel del mar varía entre 1,200 y 3,200 m (promedio de 2,264 m); las precipitaciones oscilan entre 443 y 1,452 mm (media anual de 917 mm), y la temperatura varía entre 8.2 y 26.2 °C, con una media anual de 13.3 °C (Silva-Flores *et al.* 2014). Los tipos de vegetación presentes en el área de estudio corresponden a bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de encino-pino y bosque de encino,

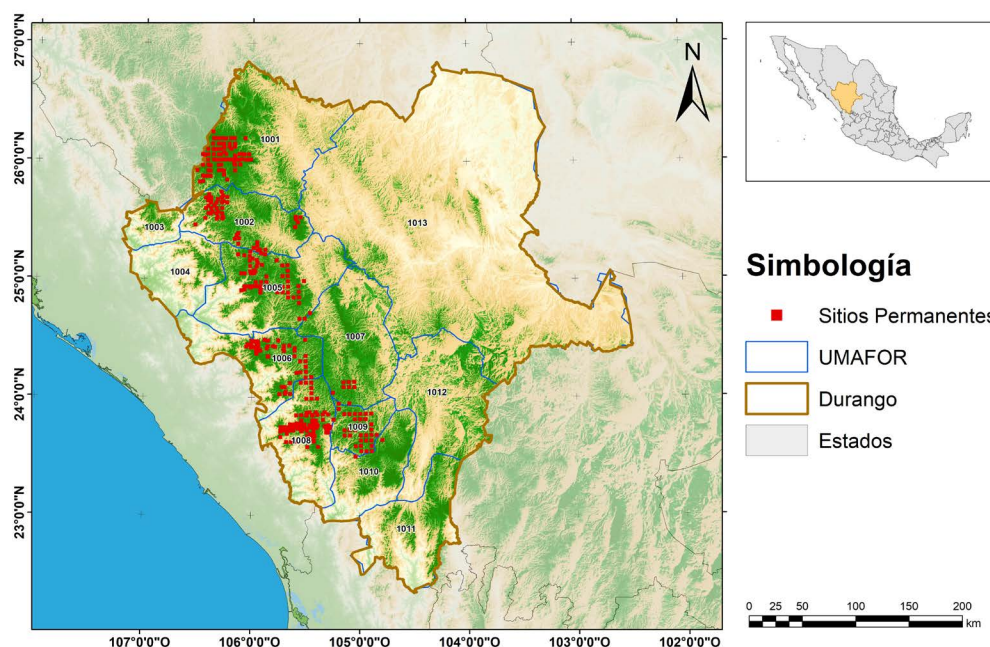


Figura 1. Área de estudio (los puntos rojos indican la ubicación de los sitios permanentes de muestreo).

principalmente. La superficie forestal del estado se encuentra dividida en regiones denominadas Unidades de Manejo Forestal Regional (UMAFOR).

Fuente de datos: Los datos se obtuvieron de 399 sitios de la red de Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS) del estado de Durango. Los sitios son de forma cuadrada de 50×50 m ($2,500 \text{ m}^2$) y la distancia entre estos es de 3 a 5 km, distribuidos de manera sistemática. Los SPIFyS cubren los principales tipos de vegetación y las distribuciones diamétricas actuales de los bosques de Durango. En cada sitio permanente se delimitaron 4 subsitios de 50×50 cm, los cuales se ubicaron a la mitad de la distancia del centro del sitio a cada vértice (17.6 m).

Muestreo de suelo: Se obtuvieron 6,116 muestras de cuatro reservorios de C: hojarasca (1,584), horizonte de fermentación (1,584), suelo de 0-30 cm (1,592) y de 30-60 cm (1,356) de profundidad. En cada subsitio se colocó un marco metálico de 0.25 m^2 y se retiraron los restos leñosos y las plantas vivas; posteriormente se tomaron muestras separadas de hojarasca y horizonte de fermentación de acuerdo con lo definido por Burton & Pregitzer (2008). Todas las muestras obtenidas dentro del marco se pesaron en fresco y se colocaron en bolsas. Las muestras de suelo mineral se obtuvieron mediante una barrena de acero inoxidable, las cuales recogieron a profundidades de 0-30 y 30-60 cm en el centro de cada subsitio de 0.25 m^2 siguiendo el mencionado protocolo de Burton & Pregitzer (2008). El material excavado se separó en los distintos materiales presentes (raíces, rocas y otros residuos orgánicos); luego, el material libre de estos materiales se pesó en bolsas utilizando una balanza con capacidad de 500 kg (precisión de 100 g). Una vez pesado el material extraído, se mezcló y se obtuvo una submuestra de entre 500 y 1,000 g (1 kg). Las muestras para determinar la densidad aparente se obtuvieron en cada subsitio con una barrera de pistón, la cual consta de un cilindro de volumen conocido.

Análisis de laboratorio: Las muestras de hojarasca y del horizonte de fermentación se extendieron y secaron a la sombra a temperatura ambiente; posteriormente, se separaron en componentes finos y gruesos y se pesaron. Las muestras finales se secaron en una estufa a 70°C hasta obtener peso constante. A continuación, se molieron

en un mortero, se tamizaron con una malla de 2 mm y se pesaron en una balanza analítica para posteriormente formar cápsulas de 20 a 40 mg (horizonte de fermentación) y de 10 a 15 mg (hojarasca) (Esquivel-Valenzuela *et al.* 2018).

Las muestras de suelo mineral se secaron al aire libre; luego se tamizaron a 2 mm para separar el suelo de las piedras, raíces finas y otros restos orgánicos. Los agregados del suelo se destruyeron utilizando un rodillo y luego se pasaron por el tamiz. Una submuestra (10 g) de la fracción de suelo mineral < 2 mm se secó en el horno a 105 °C hasta alcanzar peso constante. Cada submuestra de 10 g se molió en un mortero; después se pasó por una malla de 2 mm, se pesó en una balanza analítica y se formaron cápsulas de entre 40 y 50 mg.

Para determinar el contenido de carbono orgánico, las fracciones obtenidas de cada componente del suelo se calcinaron en un analizador elemental Thermo Scientific Flash 2000 a 950 °C por el método de oxidación, empleando oxígeno como agente oxidante (AOAC 2005).

Determinación de los almacenes de carbono orgánico en el suelo: Para calcular el contenido de carbono en la hojarasca y el horizonte de fermentación se utilizó la siguiente ecuación (IPCC 2006):

$$C = PS \times PC \times A$$

donde C es el contenido de carbono (Mg), PS es el peso seco de la muestra (kg), PC es la proporción de carbono estimada en el laboratorio y A es el área muestreada (m²).

Para calcular el contenido de carbono por hectárea del suelo a profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm, se empleó la ecuación (IPCC 2006):

$$COS = PC \times DA \times VS$$

donde:

COS es el carbono orgánico del suelo (Mg ha⁻¹), PC es la proporción de carbono estimada en el laboratorio (g C g⁻¹ de suelo), DA es la densidad aparente del suelo (g cm⁻³), VS es el volumen de suelo (m³) por unidad de superficie (ha).

Cálculo de la incertidumbre: La incertidumbre de los valores de C se estimó con la siguiente fórmula (Casanoves *et al.* 2017):

$$I = \left(\frac{LS - \bar{x}_i}{\bar{x}_i} \right) \times 100$$

donde: I es la incertidumbre (%), LS el límite superior del intervalo de confianza, y \bar{x} la media del contenido de carbono del reservorio i. La ecuación anterior fue propuesta por el IPCC (2006), quien define la incertidumbre como la mitad del intervalo de confianza de 95 %, dividido por el valor estimado del COS.

Almacenes de C por tipo de bosque y de suelo: Cada sitio permanente fue asignado a un tipo de vegetación a partir de información vectorial de la serie VI de la carta de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2017). Se consideraron los siguientes tipos de vegetación: bosque de pino (BP), bosque encino (BQ), bosque de encino-pino (BQP), y bosque de pino-encino (BPQ). Una vez obtenida esta base cartográfica se realizó la sobreposición con el tipo de suelo. La base fue el conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1:250,000 Serie II (INEGI 2007). El procedimiento anterior se llevó a cabo en el software ArcGIS 10.0.

Finalmente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, con un intervalo de confianza de 95 %, y una prueba *post hoc* (prueba de Tukey) de comparación de medias para determinar la existencia de diferencias significativas en los reservorios de C entre tipos de vegetación y tipos de suelo.

Resultados

En la [Tabla 1](#) se presenta el resumen estadístico de los porcentajes y almacenes de COS, así como su incertidumbre asociada, en los reservorios evaluados. Las mayores proporciones de carbono se obtuvieron para la hojarasca, seguida del horizonte de fermentación. La proporción de carbono más baja se encontró en la capa de suelo de 30-60 cm. El COS fue altamente variable y se presentó en un rango de 12.3 a 467.5 Mg ha⁻¹ en los primeros 30 cm de profundidad, y de 1.9 a 254.1 Mg ha⁻¹ de los 30 a 60 cm. Alrededor de 70 % del COS se almacena en los primeros 30 cm de profundidad ([Tabla 1](#)). Por otra parte, el contenido (concentración) de C en el suelo fue relativamente bajo, con valores de 3.57 y 1.62 % a los 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente, lo que indica una disminución de la concentración de COS conforme aumenta la profundidad. En general, la proporción de COS en los primeros 30 cm es dos veces mayor a la concentración en la capa de suelo de 30-60 cm.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las concentraciones y almacenes de COS, así como la incertidumbre asociada, en los reservorios evaluados.

Reservorio	C	N	Media	Mín	Máx	SD	IC (95 %)		Incert (%)
							Inf	Sup	
Hojarasca	%	396	47.37	30.31	64.03	5.50	46.83	47.91	1.15
	Mg ha ⁻¹	396	8.29	0.17	42.31	6.85	7.77	9.25	8.73
HF	%	396	21.93	1.31	56.24	11.32	20.81	23.04	5.07
	Mg ha ⁻¹	398	1.07	0.01	9.21	1.40	0.93	1.21	13.30
COS 0-30 cm	%	396	3.57	0.39	19.20	2.64	3.31	3.84	7.52
	Mg ha ⁻¹	396	112.26	12.37	467.50	74.14	104.93	119.60	6.68
COS 30-60 cm	%	339	1.62	0.05	8.76	1.31	1.48	1.76	8.48
	Mg ha ⁻¹	339	53.05	1.90	254.10	42.73	48.78	57.62	9.08
C total	Mg ha ⁻¹	336	171.41	26.34	578.27	100.56	160.61	182.22	6.31

La incertidumbre del COS en los primeros 30 cm de suelo fue 6.68 %, mientras que en la capa de 30-60 cm fue 9.08 %. Lo anterior implica que el valor promedio del COS en los primeros 30 cm de suelo se encuentra, con una probabilidad del 95 %, en un rango que va de 104.76 a 119.76 Mg ha⁻¹, mientras que en la capa de 30-60 cm el promedio se encuentra entre 48.23 y 57.87 Mg ha⁻¹. La incertidumbre total de la línea base del C en el suelo forestal, es decir, incluyendo los cuatro reservorios fue 6.31 %, lo que significa que los almacenes de C en los bosques de Durango oscilan, en promedio, entre 160.59 y 182.23 Mg ha⁻¹. El rango de valores de COS para la profundidad de referencia del IPCC (60 cm) osciló entre 17.03 y 612.5 Mg ha⁻¹, lo que comprueba la alta variabilidad del COS en este tipo de bosques.

Las concentraciones promedio de C en la hojarasca fueron estadísticamente similares entre tipos de bosque (F -value = 1.589, $P > F = 0.191$; $\alpha = 0.05$), con un rango de 44.67 % en el BQ a 48.37 % en el BP, y una media general de 47.2 % ([Tabla 2](#)). Las concentraciones de C mínima (35.12 %) y máxima (54.23 %) en este reservorio se encontraron en el BQ. Los almacenes de C en la hojarasca fueron mayores en el BPQ, con una media de 8.475 Mg ha⁻¹; mientras que los almacenes más bajos se encontraron en el BQ, con 4.787 Mg ha⁻¹. Estos resultados evidencian que en los bosques de pino y pino-encino la cantidad de biomasa que se aporta al suelo forestal es mayor que en los de encino y encino-pino.

Las concentraciones promedio de C en el horizonte de fermentación fueron estadísticamente iguales (F -value = 2.564, $P = 0.054$; $\alpha = 0.05$). La concentración promedio de C en el horizonte de fermentación fue 23.95 %, con un

rango entre 20.51 % (BQP) y 27.63 % (BPQ); mientras que los almacenes de C fluctuaron desde 0.01 (BQ) hasta 1.87 Mg ha⁻¹ (BPQ).

Tabla 2. Concentraciones y almacenes de carbono orgánico en el suelo por tipo de vegetación. BP = Bosque de pino, BPQ = Bosque de pino-encino, PQ = Bosque de encino, BQP = Bosque de encino-pino; IC = Intervalo de confianza; DE = Desviación estándar.

Reservorio	Tipo de bosque	C (%)				C (Mg ha ⁻¹)			
		Media	IC (95 %)		DE	Media	IC (95 %)		DE
			Inf	Sup			Inf	Sup	
Hojarasca	BP	48.37	47.40	49.33	4.85	8.28	6.82	9.73	7.30
	BPQ	47.66	46.47	48.86	5.05	8.48	6.82	10.13	7.00
	BQ	44.67	35.12	54.23	6.01	4.79	1.37	8.20	2.15
	BQP	48.14	45.21	51.07	6.61	5.88	4.47	7.28	3.17
Horizonte de fermentación	BP	24.45	22.44	26.46	10.07	0.97	0.72	1.21	1.23
	BPQ	27.63	25.29	29.96	9.85	1.07	0.72	1.42	1.47
	BQ	23.24	2.60	43.87	12.97	0.59	0.01	1.57	0.62
	BQP	20.51	16.17	24.85	9.78	1.03	0.19	1.87	1.89
Suelo 0-30 cm	BP	4.05	3.46	4.64	2.96	122.01	106.28	137.73	78.84
	BPQ	3.86	3.11	4.62	3.17	119.59	99.12	140.07	86.50
	BQ	3.57	0.97	6.17	1.63	121.55	10.59	232.52	69.74
	BQP	3.34	2.43	4.26	2.06	101.34	72.01	130.67	66.15
Suelo 30-60 cm	BP	1.89	1.58	2.20	1.55	61.83	51.59	72.07	51.35
	BPQ	1.50	1.23	1.77	1.14	48.79	40.94	56.63	33.13
	BQ	1.80	0.80	2.79	0.62	59.49	9.82	109.16	31.22
	BQP	1.62	1.02	2.23	1.37	56.11	35.52	76.70	46.45

La mayor reserva de COS en los primeros 30 cm de suelo se encontró en el BP (122.01 Mg ha⁻¹), aunque fue similar los almacenes del BQ (Tabla 2); los más bajos se encontraron en el BQP (101.337 Mg ha⁻¹). La concentración de C en el suelo de 0-30 cm no mostró una variación significativa entre tipos de bosque (F -value = 1.787, P = 0.149; α = 0.05), presentándose valores entre 3.34 % (BQP) y 4.05 % (BP). Tanto las concentraciones como los almacenes de C en la capa de suelo de 30-60 cm presentaron el mismo patrón (F -value = 0.178, P = 0.911; α = 0.05) que para la capa de 0-30 cm. La mayor concentración de C se presentó en el BP, así como el mayor contenido de C (Tabla 2).

El análisis de varianza no identificó diferencias estadísticamente significativas en los promedios del contenido de carbono total entre tipos de bosques (F -value = 1.253, P = 0.291; α = 0.05). Los mayores almacenes de C orgánico total se encontraron en el BP (188.8 Mg ha⁻¹) y los menores en el BQP (164.35 Mg C ha⁻¹) (Tabla 3, Figura 2). El contenido de C en los suelos del BP fue 11, 10 y 13 % mayor que en los BPQ, BQ y BQP, respectivamente.

Se identificaron seis tipos de suelo en el área de estudio, en los cuales el COS promedio osciló entre 142.97 y 385.68 Mg ha⁻¹. El análisis de varianza indicó la existencia de diferencias estadísticas significativas en los promedios del contenido de carbono total entre tipos de suelo (F -value = 3.185, P = 0.0081**; α = 0.05). De acuerdo con

la prueba de Tukey, estas diferencias se presentaron entre los suelos Regosol y Phaeozem, así como entre los tipos Leptosol y Phaeozem (Figura 3). En ese sentido, los almacenes más altos se presentaron en los suelos de tipo Phaeozem ($248.51 \text{ Mg ha}^{-1}$), mientras que los más bajos se encontraron en el suelo Regosol ($142.92 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Tabla 4). Estas diferencias estadísticamente significativas se debieron al efecto del tipo de suelo en los reservorios de C en el horizonte de fermentación ($F\text{-value} = 3.535$, $P = 0.0039^{**}$; $\alpha = 0.05$) y el suelo de 0-30 cm ($F\text{-value} = 4.358$, $P = 0.0004^{**}$; $\alpha = 0.05$).

Tabla 3. Almacenes de carbono orgánico total en el suelo de los bosques de Durango. BP = Bosque de pino, BPQ = Bosque de pino-encino, PQ = Bosque de encino, BQP = Bosque de encino-pino; IC = Intervalo de confianza; DE = Desviación estándar.

Tipo de bosque	C (Mg ha^{-1})					
	Media	Min	Máx	IC (95%)		DE
				Inf	Sup	
BP	188.85	25.73	578.27	166.69	211.01	111.10
BPQ	168.29	48.76	567.94	143.47	193.11	104.86
BQ	169.95	71.32	310.12	114.34	200.55	102.37
BQP	164.35	59.50	399.61	121.47	207.23	96.71

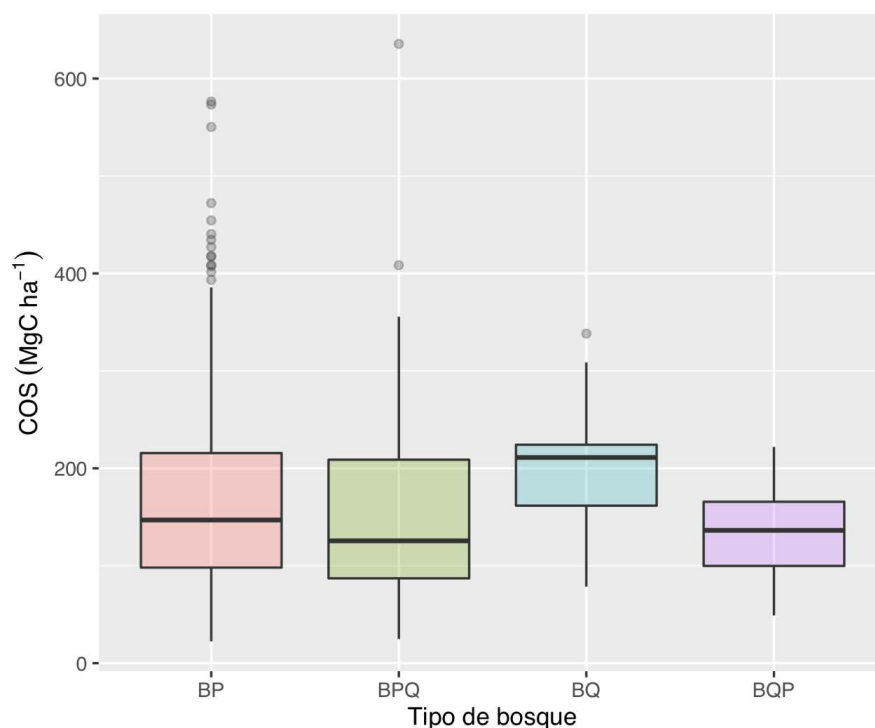


Figura 2. Variabilidad de los almacenes de COS por tipo de bosque en Durango.

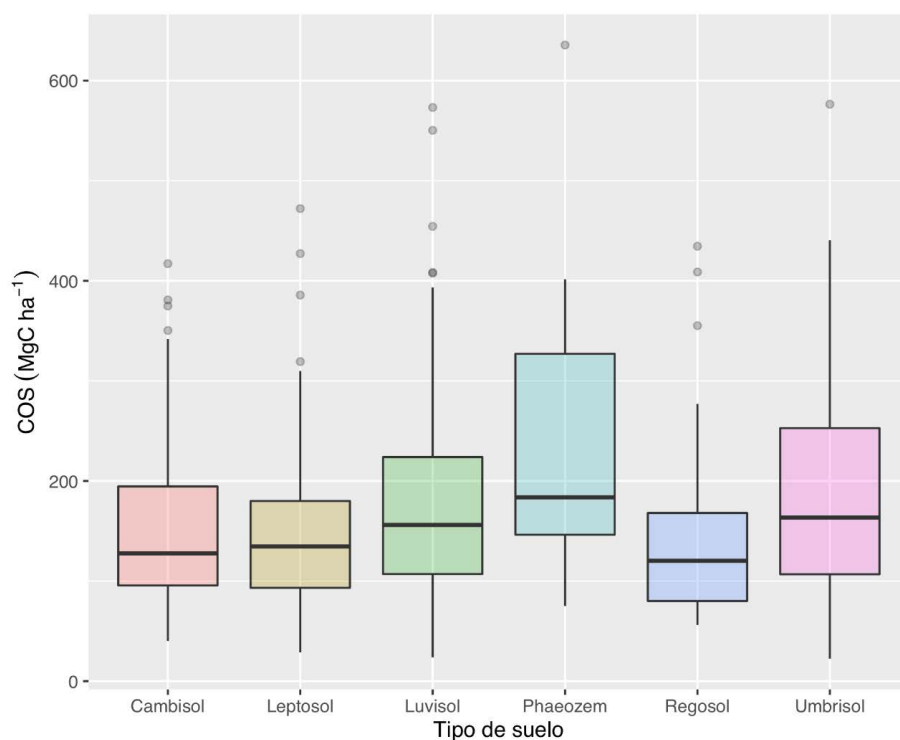


Figura 3. Variabilidad de los almacenes de COS por tipo de suelo en Durango.

Tabla 4. Almacenes de COS por tipo de suelo

Tipo de suelo	Media	N	DE	Mínimo	Máximo	PruebaTukey
Regosol	142.97	49	88.94	56.24	434.58	a
Leptosol	151.28	80	86.95	28.72	472.19	a
Umbrisol	194.18	49	114.75	22.41	576.44	ab
Luvisol	180.27	110	101.85	23.79	573.24	ab
Cambisol	168.13	30	108.50	40.01	417.14	ab
Phaeozem	248.51	10	172.88	75.01	635.62	b
Total	170.67	328	103.69	22.41	635.62	

Discusión

La concentración de C en suelos forestales puede variar desde 0 en suelos muy jóvenes hasta 50 % en suelo con alto contenido de materia orgánica (Trettin & Jurgensen 2003), con la mayoría de los suelos con concentraciones de C entre 0.3 y 11.5 % en los primeros 20 cm del suelo mineral. La concentración promedio de C en los primeros 30 de suelo obtenida en este estudio (3.57 %) es acorde con los porcentajes reportados para bosques templados en México (Castillo-Pacheco *et al.* 2016, Pérez-Ramírez *et al.* 2013, Acosta-Mireles *et al.* 2009).

64 % de los almacenes de C orgánico total en el suelo se encuentra en la capa de 0-30 cm. Estos resultados coinciden con lo reportado por Morales-Inocente *et al.* (2020), quienes señalan que el carbono orgánico retenido en el suelo en bosques de El Salto, Durango, alcanza 187.06 Mg ha⁻¹, de las cuales 70 % se encuentra en los primeros 20 cm de profundidad. De igual manera, son similares a los reportados por Avilés-Hernández *et al.* (2009), quienes reportan valores de C total entre 159 y 208 MgC ha⁻¹ en un bosque de *Fagus grandifolia* en el estado de Hidalgo. En ese mismo estudio se encontró que la mayor reserva de C se encuentra en la capa de suelo de 0-15 cm.

Respecto al contenido C en la materia orgánica y el horizonte de fermentación, se obtuvieron valores promedio de 8.29 y 1.07 MgC ha⁻¹, respectivamente. La FAO (2017) señala que el C en el horizonte de fermentación es de alrededor de 1.33 Mg ha⁻¹, valor ligeramente mayor al obtenido en este estudio. Por su parte Flores & López (2015), encontraron que en las regiones templadas de México la hojarasca aporta 6.91 Mg ha⁻¹ al C en el suelo, mientras que el horizonte de fermentación contribuye con 5.88 MgC ha⁻¹. Estos resultados son congruentes con los obtenidos en este estudio.

El promedio de COS en la capa de 0-30 alcanzó 112.26 Mg ha⁻¹, valor menor a los 174.28 Mg ha⁻¹ reportados por Solís-Hernández *et al.* (2014) para los primeros 30 cm de suelo en bosques de la región de El Salto, Durango. En ese sentido, en la capa de 30-60 cm se observó una disminución de COS de más de 50 % respecto a la capa de 0-30 cm. El hecho de que el COS disminuya con la profundidad del suelo se debe, de acuerdo con Shaver & Aber (1996), a que la mayor actividad de desarrollo de las raíces de hierbas, arbustos y muchas de las raíces finas de los árboles se realiza en los primeros centímetros de suelo.

En un estudio realizado por Vela *et al.* (2012) para medir los niveles de carbono orgánico total en el suelo de las áreas de conservación de la Ciudad de México, se definieron límites de los intervalos de COS para la capa 0-30 cm, con el fin de tener una referencia general de lo que se considera valores altos y bajos. Los rangos establecidos fueron: bajo (< 50 MgC ha⁻¹), medio (50-100 MgC ha⁻¹), alto (100-150 MgC ha⁻¹) y muy alto (> 150 MgC ha⁻¹). El carbono total obtenido en este estudio para la capa de 0-30 cm fue 112.26 Mg C ha⁻¹, valor que de acuerdo con estos autores se clasificaría como alto; el COS en la capa 30-60 cm estaría dentro de la categoría medio, con 53.05 MgC ha⁻¹.

Las reservas de COS en suelos forestales pueden llegar a representar hasta 60 % del carbono total en los bosques templados, conteniendo la mayoría de los suelos entre 0.3 y 11.5 % en los 20 cm superficiales de suelo mineral (Lal 2005). En este estudio los almacenes de COS por reservorio se distribuyeron de la siguiente manera: materia orgánica, 5 %; horizonte de fermentación, 1 %; capa de 0-30 cm, 64 %; y capa de 30-60 cm, 31 %. Estas proporciones difieren de lo reportado por Silva-Ávila (2020), quien estimó 196.16 MgC ha⁻¹ en los bosques del estado de Durango, de los cuales la materia orgánica contribuyó con 2 %, el horizonte de fermentación con 0.83 %, el suelo de 0-30 cm con 76 % y el suelo de 30 a 60 cm con 21.07 %.

Las reservas de C orgánico total en el suelo oscilaron entre 164.35 (bosque de encino-pino) y 188.85 Mg ha⁻¹ (bosque de pino). Estos resultados son mayores a lo reportado por Castillo-Pacheco *et al.* (2016), quienes estimaron 140 MgC ha⁻¹ en la cuenca Mololoa, en Nayarit, y a los obtenidos por Pérez-Ramírez *et al.* (2013), con 103 Mg ha⁻¹. Por su parte, Acosta-Mireles *et al.* (2009) obtuvieron un valor promedio de carbono en el suelo de 183.2 Mg ha⁻¹ en bosques de *Pinus patula* Schl. et Cham. en Tlaxcala, a una profundidad de 40 cm, valor menor al obtenido en este estudio para bosques de pino.

En el estudio de Vela *et al.* (2012) los bosques de pino-encino registraron 121.3 Mg ha⁻¹ de C orgánico total, valor por debajo del obtenido en este estudio (168.29 Mg ha⁻¹). En dicho estudio, los principales tipos de vegetación fueron bosque de pino y de pino-encino; en ese sentido, en el presente estudio el tipo de bosque de encino-pino fue el que presentó el promedio más bajo de C total (164.35 Mg C ha⁻¹). En el mismo estudio, el bosque de *Abies* presentó el nivel más alto de COS (145.6 Mg ha⁻¹), seguido del bosque de *Quercus* (121.3 Mg ha⁻¹) y el bosque mezclado de *Pinus* (119.4 Mg ha⁻¹). Las estimaciones obtenidas en este estudio para los dos últimos tipos de bosque fueron mayores en ambos casos, con 169.95 (± 102.37) y 188.85 (± 111.1) Mg ha⁻¹, respectivamente. En general, los valores promedio de COS medidos en el área de estudio se encuentran dentro de los rangos reportados en otros estudios para bosques templados (Acosta-Mireles *et al.* 2009, Cruz-Flores & Etchevers-Barra 2011, Vela *et al.* 2012).

Morfin *et al.* (2015) realizaron un estudio con el objetivo de estimar el total del carbono almacenado en los reservorios de las áreas forestales del país con base en los datos obtenidos en el INFyS; estos autores reportan contenidos de C promedio entre 2.61 y 99.86 Mg ha⁻¹ con una media de 28.74 Mg ha⁻¹. En este estudio el COS promedio en los primeros 30 cm de profundidad estimado para el bosque de pino fue 122.01 Mg ha⁻¹, tres veces más alto al reportado por Morfin *et al.* (2015) para este tipo de vegetación (38.225 MgC ha⁻¹). Esta diferencia se puede atribuir a la poca representatividad de la muestra de suelos del INFyS para el estado de Durango (39 conglomerados).

El tipo de suelo con los mayores almacenes de COS total fue Phaeozem (248.51 Mg ha⁻¹), lo cual difiere de lo reportado por Cruz-Flores & Etchevers (2011), quienes encontraron almacenes de COS de 146 Mg ha⁻¹ en los primeros 20 cm de suelo en bosques de pino-oyamel, al igual que con lo obtenido por Baez-Pérez *et al.* (2012) para bosque de encino (163 Mg ha⁻¹). De acuerdo con Galicia *et al.* (2016), los suelos phaeozems presentan un marcado horizonte superficial rico en C, ya que poseen una elevada acumulación de materia orgánica porque se desarrollan en condiciones húmedas y subhúmedas, con mucha incorporación de residuos vegetales y alta actividad microbiana en época de lluvias. Los menores almacenes se registraron en el suelo Regosol (142.97 Mg ha⁻¹), lo cual era de esperarse al tratarse de suelos minerales escasamente desarrollados en materiales no consolidados (Galicia *et al.* 2016), por lo que poseen baja capacidad de retención de humedad y bajos contenidos de materia orgánica (Siebe *et al.* 2003).

Vela *et al.* (2012) afirman que el COS tiene una alta variación espacial dependiendo del tipo de suelo. Por ejemplo, en su estudio, los Phaeozems en zonas planas con coberturas de encinos, el COS alcanzó 150 Mg ha⁻¹, mientras que en suelos regosoles y leptosoles con cobertura de pino, el COS osciló entre 50 y 100 Mg ha⁻¹. En el presente estudio los suelos regosoles y leptosoles presentaron almacenes de COS de 142.9 (± 88.9) y 151.3 (± 86.9) Mg ha⁻¹, respectivamente, valores superiores a los reportados por estos autores. Saynes *et al.* (2005) reporta almacenes de COS para suelos de tipo Luvisol en Oaxaca (133 Mg ha⁻¹) y Regosol/Phaeozem en Jalisco (146 Mg ha⁻¹), almacenes menores a los estimados en este estudio para los suelos luvisoles (180.3 Mg ha⁻¹). Galicia *et al.* (2016) señalan que los contenidos de COS en los bosques templados de México varían ampliamente entre los tipos de suelo, desde 60 Mg ha⁻¹ (leptosoles) hasta 559 Mg ha⁻¹ (andosoles). En el presente estudio los almacenes oscilaron entre 142.9 (± 88.9) MgC ha⁻¹ (regosoles) hasta 248.5 (± 172.8) MgC ha⁻¹ (phaeozems), lo cual confirma lo señalado por dichos autores.

Con base en los resultados se concluye que el tipo de bosque no influye en los almacenes de COS, pero sí el tipo de suelo. Asimismo, que los reservorios de COS en los bosques templados de Durango son relativamente altos comparados con el mismo tipo de vegetación en otras regiones del país.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del presente estudio a través del Fondo para Proyectos de Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales (clave: PN-206-3380).

Literatura citada

- Acosta-Mireles M, Carrillo-Anzures F, Díaz-Lavariaga M. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* **27**: 105-114.
- AOAC [Association of Official Agricultural Chemists]. 2005. *Official Methods of Analysis. Dumas method* (990.03). Washington DC, USA: AOAC international. ISBN 0-935584-77-3.
- Avilés-Hernández V. 2009. Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Agrociencia* **43**: 457-464.
- Batjes NH. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* **47**: 151-163. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x>
- Bell MJ, Worrall F. 2009. Estimating a region's soil organic carbon baseline: the undervalued role of land-management. *Geoderma* **152**: 74-84.
- Bohn HL. 1976. Estimate of organic carbon in world soils. *Soil Science Society of America Journal* **46**: 468-470. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000030045x>

- Bohn HL. 1982. Estimate of organic carbon in world soils: II. *Soil Science Society of America Journal* **46**: 1118-1119. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050050x>
- Burton AJ, Pregitzer KS. 2008. Measuring forest floor, mineral soil, and root carbon stocks. In: Hoover CM, ed. *Field measurements for forest carbon monitoring*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp129-142. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8506-2>
- Cai A, Feng W, Zhang W, Xu M. 2016. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China. *Journal of Environmental Management* **172**: 2-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.009>
- Casanoves F, Cifuentes JM, Chacón LM. 2017. *Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales. Buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos*. Serie técnica. Informe técnico 410. Turrialba, Costa Rica: CATIE. ISBN 978-9977-57-672-5
- Castillo-Pacheco LA, Bojórquez-Serrano JI, Hernández-Jiménez A, García-Paredes D. 2016. Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo. *Cultivos Tropicales* **37**: 72-78. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2035.4805>
- Cruz-Flores G, Etchevers-Barra JD. 2011. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia* **45**: 849-862.
- Davidson EA, Trumbore SE, Amundson R. 2000. Soil warming and organic carbon content. *Nature* **408**: 789-790. DOI: <https://doi.org/10.1038/35048672>
- Esquivel-Valenzuela B, Cueto-Wong JA, Cruz-Gaistardo CO, Guerrero-Peña A, Jarquín-Sánchez A, Burgos-Córdova D. 2018. Carbono orgánico y nitrógeno total en suelos forestales de México mediante espectroscopia VIS-NIR. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* **9**: 295-313. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.158>
- Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. 1993. Organic-carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* **57**: 192-194. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010034x>
- Etchevers B, Masera O, Balbontín D, Gómez D, Monterroso A, Martínez R, Acosta M, Martínez M, Ortiz C. 2006. Soil carbon sequestration in México and Central America (biome a). In: Lal R, Cerri CC, Bernoux M, Etchevers J, Cerri E, eds. *Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York, USA: Howarth Press, pp. 119-146. ISBN 978-15-6-022137-1.
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. 2017. *Soil organic carbon: the hidden potential*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. ISBN 978-92-5-109681-9
- Flores CG, López LAB. 2015. *Re-descubriendo el suelo: su importancia ecológica y agrícola*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. ISBN 978-6070-27-468-8
- Galicia L, Gamboa CAM, Cram S, Chávez VB, Peña RV, Saynes V, Siebe V. 2016. Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana* **34**: 1-29.
- González-Elizondo MS, González-Elizondo M, Tena-Flores JA, Ruacho-González L, López-Enríquez L. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una Síntesis. *Acta Botánica Mexicana* **100**: 351-403. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40>
- Halldorsson G, Arnalds A, Bampa F, Þorsteinsdóttir A, Sigurdsson B, Gudmundsson J, Montanarella L, eds. 2013. *Soil carbon sequestration for climate, food security and ecosystem services*. Proceedings of the International Conference, Reykjavik, Iceland: Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-79-35595-0.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática]. 2007. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II 1: 250 000. Aguascalientes, México.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática]. 2017. Datos de uso del suelo y vegetación 1:250 000 (vectorial). Aguascalientes, México.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Japan. <http://www.ipcc-nggip-iges.or.jp>
- Kirschbaum MF. 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry* **48**: 21-51. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1006238902976>

- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* **123**: 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lal R. 2005. Forest Soils and Carbon Sequestration. *Forest Ecology and Management* **220**: 242-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Morales-Inocente MA, Nájera-Luna JA, Escobedo-Bretado MA, Cruz-Cobos F, Hernández FJ, Vargas-LarretaLB. 2020. Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* **28**: 5-13.
- Morfin R, Michel JE, González FJM, Carrillo MR, Rangel OL, Orozco OJ, Rodríguez AG, Guerrero PG. 2015. *Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México*. Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Pan G, Smith P, Pan W. 2009. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture Ecosystems & Environment* **129**: 344-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.10.008>
- Pérez-Ramírez S, Ramírez MI, Jaramillo-López PF, Bautista F. 2013. Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* **19**: 157-173. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Saynes V, Hidalgo C, Etchevers JD, Campo JE. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology* **29**: 282-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.11.007>
- Scharlemann PWJ, Tanner VJE, Hiederer R, Kapos V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* **5**: 81-91, DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>
- Segura-Castruita MA, Sánchez-Guzmán P, Ortiz-Solorio CA, Gutiérrez-Castorena MC. 2005. Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana* **23**: 21-28.
- Shaver GR, Aber JD. 1996. Carbon and nutrient allocation in terrestrial ecosystems. In: Breymeyer AI, Hall DO, Melillo JM, Agren GI, eds. *Global change: effects on coniferous forests and grasslands*. New York, USA: John Wiley. pp. 183-198. ISBN 978-0471968375.
- Sheikh MA, Kumar M, Bussmann RW. 2019. Altitudinal variation in soil organic carbon stock in coniferous subtropical and broadleaf temperate forests in Garhwal Himalaya. *Carbon Balance Management* **4**: 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-6>
- Siebe C, Bocco G, Sánchez J, Velázquez A. 2003. Suelos: Distribución, características y potencial de uso. In: Velázquez A, Torres A, Bocco G, eds. *Las enseñanzas de San Juan, Investigación participativa para el manejo integral de los recursos naturales*. México: Instituto Nacional de Ecología. Dirección de Publicaciones. ISBN 968-817-602-8.
- Silva-Ávila O. 2020. *Relación entre el carbono orgánico y el nitrógeno del suelo y la productividad forestal de los bosques de Durango*. MSc Thesis. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto.
- Silva-Flores R, Pérez-Verdín G, Wehenkel C. 2014. Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *PLoS One* **9**: e105034. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105034>
- Solis-Hernández A, Nájera-Luna JA, Méndez-González J, Vargas-Larreta B, Álvarez-Gallegos M. 2014. Carbono orgánico del suelo en rodales silvícolas del ejido La Victoria, Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* **22**: 5-11.
- Trettin CC, Jurgensen MF. 2003. Carbon cycling in wetland forest soils. In: Kimble J, Heath H, Birdsey R, Lal R, eds. *The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect*. USA: CRC Press LLC. pp. 1-21 ISBN: 1-56670-583-5.
- Vela CG, López BJ, Rodríguez GML. 2012. Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal. *Investigaciones Geográficas* **77**: 18-30.

Editor de sección: Enrique Jurado

Author contributions: BVL, diseño del estudio, análisis estadístico, redacción y revisión del manuscrito. MAR, colecta y sistematización de información y redacción de manuscrito. JACW, diseño de la metodología. JOLM, FCC, JANL y CGAC, redacción y revisión del manuscrito.