



DOI: 10.29298/rmcf.v16i88.1512

Artículo de Investigación

## Uso de suelo, propiedades edáficas y almacenes de carbono en el Parque Estatal El Ocotol, México

### Land uses, soil properties and carbon storage in *El Ocotol State Park, Mexico*

Carola Mendoza Aparicio<sup>1</sup>, Gustavo Álvarez Arteaga<sup>1\*</sup>, Miguel Martínez Tapia<sup>1</sup>, María Antonieta Reyes Zuazo<sup>1</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 13 de agosto de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 5 de febrero de 2025.

<sup>1</sup>Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México. México.

\*Autor para correspondencia; correo-e: [galvareza@uaemex.mx](mailto:galvareza@uaemex.mx)

\*Corresponding author; e-mail: [galvareza@uaemex.mx](mailto:galvareza@uaemex.mx)

#### Resumen

El Parque Estatal El Ocotol, ubicado en el Estado de México, es un área prioritaria de protección y conservación de ecosistemas locales, con una función destacada en la provisión de esos servicios. Además de ser un generador de empleo a través del ecoturismo, este espacio enfrenta desafíos derivados de los cambios históricos en el uso del suelo, los cuales han ocasionado transformaciones significativas en la estructura y composición de sus suelos y cubierta vegetal. Sin embargo, la magnitud de tales alteraciones y sus implicaciones en los servicios ecosistémicos proporcionados por el parque siguen siendo poco comprendidas. En este contexto, la presente investigación se enfocó en estimar la capacidad del suelo y la vegetación arbórea del parque como proveedores de servicios ecosistémicos relacionados con la captura y almacenamiento de carbono. A partir del análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo, el registro dasométrico de los árboles y de ecuaciones alométricas, se determinó la capacidad de las comunidades forestales para acumular carbono en suelos y vegetación arbórea. Los mayores reservorios de carbono se concentran en la biomasa arbórea con valores entre 123 y 330 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que en el suelo se registraron entre 51 y 128 Mg ha<sup>-1</sup>. La reforestación con *Pinus pseudostrobus* de 20 años mostró la mayor capacidad de almacenamiento de Carbono Orgánico Total con 406 Mg ha<sup>-1</sup>. Los resultados subrayan la importancia de conservar y regular el uso de los recursos naturales del parque para garantizar la provisión continua de los servicios ecosistémicos que ofrece.

**Palabras clave:** Biomasa arbórea, parque, *Pinus pseudostrobus* Lindl., propiedades edáficas, reforestación, servicios ecosistémicos.

#### Abstract

The *El Ocotol State Park*, located in *Estado de México*, is a priority area for the protection and conservation of local ecosystems, playing a prominent role in the provision of ecosystem services. In addition to being a source of employment through ecotourism, this area faces challenges stemming from historical land-use changes, which have caused significant transformations in the structure and composition of its soil and vegetation cover. However, the

extent of these alterations and their implications for the ecosystem services provided by the park remain poorly understood. In this context, the present study focused on estimating the capacity of the park's soil and tree vegetation to preserve and enhance ecosystem services related to carbon capture and storage. Through the analysis of the physical and chemical properties of the soil, mensuration records of the trees, and allometric equations, the capacity of forest communities to store carbon in soils and tree biomass was determined. The largest carbon reservoirs were found in tree biomass, with values ranging from 123 to 330 Mg ha<sup>-1</sup>, while soils registered between 51 and 128 Mg ha<sup>-1</sup>. Reforestation with 20-year-old *Pinus pseudostrobus* showed the highest Total Organic Carbon storage capacity, with 406 Mg ha<sup>-1</sup>. These results underscore the importance of conserving and regulating the use of the park's natural resources to ensure the continuous provision of its ecosystem services.

**Keywords:** Tree biomass, park, *Pinus pseudostrobus* Lindl., soil properties, reforestation, ecosystem services.

## Introducción

Las áreas naturales protegidas (ANP) surgieron en Norteamérica con su primer decreto a finales del siglo XIX, y desde entonces muchos países han incorporado este instrumento en su legislación ambiental (Chavarría et al., 2019). En México, esos espacios son especialmente importantes debido a que en ellos habitan comunidades que dependen del aprovechamiento de sus recursos naturales, por lo que su manejo requiere del equilibrio entre la preservación de los ecosistemas con la reducción de la pobreza y la marginación de sus pobladores (Arriola et al., 2014).

En la gestión de las ANP se han implementado estrategias que incluyen el pago por servicios ecosistémicos (SE), implementación de proyectos productivos y el turismo de naturaleza. El turismo en las ANP debe combinar la preservación de los recursos con el desarrollo económico local y el fortalecimiento cultural; sin embargo, cuando se practica de manera no regulada, puede provocar pérdida de biodiversidad y deterioro de la calidad ambiental de sus componentes biofísicos y la reducción de los servicios ecosistémicos que prestan a la sociedad (Canteiro et al., 2018; Medina-Castro et al., 2019).

Para estimar la capacidad de las ANP como proveedores de SE es importante considerar el monitoreo oportuno de los componentes biofísicos; en el caso del suelo, se han analizado propiedades y procesos que determinan su salud, de forma que puedan dar

referencia de su condición actual en función de su manejo o grado de alteración. En esa línea, a nivel internacional se han propuesto cuadros de indicadores de calidad en suelos de ecosistemas forestales de China (Wang *et al.*, 2023); en regiones mediterráneas del Centro-Este de España (Andrés-Abellán *et al.*, 2019); y en agroecosistemas cafetaleros de Colombia (Afanador-Barajas *et al.*, 2020).

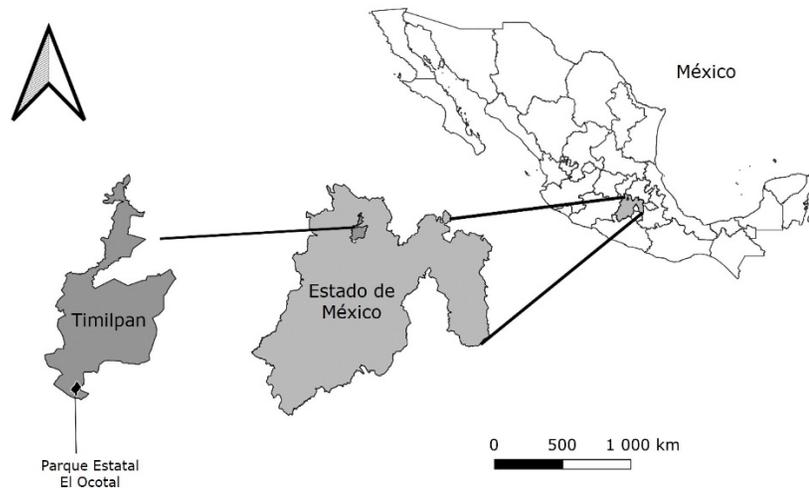
En México, estudios realizados por Álvarez-Arteaga *et al.* (2020) y Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011) han propuesto indicadores regionales de la calidad del suelo, que eventualmente permiten la estimación de los SE, tanto en espacios naturales como aquellos alterados por las actividades humanas. En el caso de la estimación de carbono en biomasa arbórea, son múltiples los estudios que han aplicado métodos no destructivos basados en ecuaciones alométricas con resultados muy eficientes (Canedoli *et al.*, 2020; Ronquillo-Gorgúa *et al.*, 2022).

Respecto al área de estudio de esta investigación, en el Parque Estatal El Ocotil (PEEO), Pérez *et al.* (2009) determinaron, cualitativamente, el impacto ambiental de las actividades turísticas mediante métodos de observación directa. Los resultados arrojaron que el flujo continuo de visitantes genera impactos negativos que se traducen en el deterioro de la cubierta vegetal, sellamiento del suelo y su erosión hídrica. Sin embargo, no pudieron constatar la magnitud de las afectaciones. Dado que El PEEO constituye un sitio estratégico para la integración del turismo de naturaleza, la promoción de servicios ecosistémicos y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, el objetivo de la presente investigación consistió en estimar la capacidad del suelo y la vegetación arbórea del parque para almacenar carbono bajo diferentes condiciones de uso de suelo.

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

El PEEO se ubica en el ejido Santiaguito Maxdá, municipio Timilpan, en el Estado de México (Figura 1), cuyas coordenadas geográficas son LN 19°48'46" y 19°47'52", y LO -99°45'17" y -99°45'11", a una altitud promedio de 2 750 m y una superficie de 122 ha (Gobierno del Estado de México, 1999).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

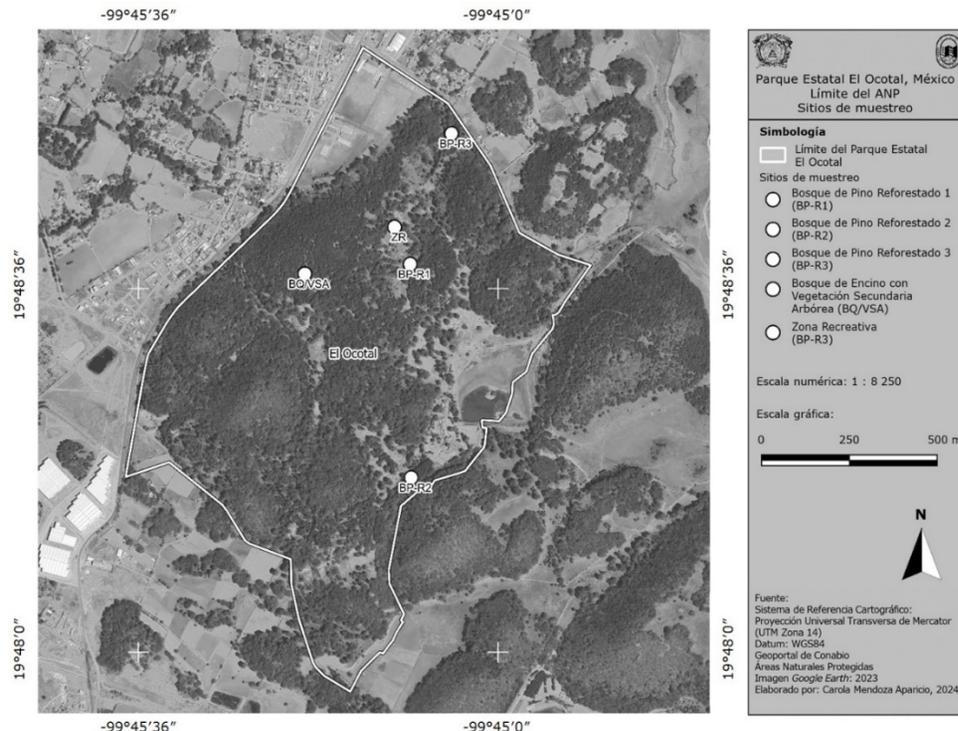
En el lugar predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 16 °C, con una precipitación media anual de 800 mm (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2016). El grupo de suelo dominante es el Feozem lúvico y háplico; la asociación arbórea está conformada por *Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *Quercus rugosa* Neé, *Q. laurina* Bonpl. y *Q. crassipes* Bonpl., en asociación con pastizal inducido (INEGI, 2016).

Los pobladores indican que hasta hace 40 años persistía el aprovechamiento forestal para obtener leña y carbón vegetal, por lo que gran parte de la cobertura vegetal actual del parque es el resultado de reforestaciones con especies de pino. Los servicios

turísticos están a cargo de miembros de la comunidad, quienes ofertan hospedaje, alimentación, vigilancia y mantenimiento.

## Caracterización y muestreo de suelo y vegetación

A partir del análisis espacial, mediante el *software* QGis Versión 3.22 (Geographic Resources Analysis Support System [GRASS], 2022) e imágenes satelitales de la plataforma *Google Earth*, se delimitaron áreas del parque con diferentes usos de suelo y vegetación. Posteriormente, se realizaron recorridos de campo para verificar la información, y se seleccionaron cinco sitios representativos de los usos de suelo, de acuerdo con la metodología propuesta por Siebe *et al.* (2016) (Figura 2).



**Figura 2.** Sitios de muestreo en el área de estudio.

Para determinar las propiedades edáficas de cada sitio, se caracterizó el espesor y condición de la capa orgánica del suelo conforme al esquema propuesto por Chertov

y Nadporozhskaya (2018) que identifica los diferentes horizontes orgánicos del suelo y sus implicaciones sobre la descomposición de los restos orgánicos. Se realizaron cuatro extracciones de suelo con barrena marca AMS® modelo 301.64 a 20, 50 y 100 cm de profundidad, obteniéndose muestras de 1 kg. Adicionalmente, se recolectaron muestras superficiales por triplicado de cada punto con el propósito de calcular la Densidad Aparente (DA) por el método del cilindro. Las muestras se llevaron a la Unidad de Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma del Estado de México para su preparación y análisis físicos y químicos durante el año 2023.

Otros parámetros analizados fueron la Densidad Real (DR) con el método del Picnómetro, textura por el método de Bouyoucos, contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS) por oxidación en húmedo, pH con el método del potenciómetro (Corning® modelo 58907) en agua, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), mediante sonda de campo (Fdit® modelo 240 v.). A excepción de este último, los métodos empleados están descritos en van Reeuwijk (2002) y en la NOM-021-RECNAT-2000 (2001).

Para la caracterización de la cubierta forestal en cada sitio, se midió el Diámetro a la Altura del Pecho ( $DAP=1.3$  m) de todos los individuos arbóreos con  $DAP>5$  cm utilizando una cinta diamétrica (Forestry Suppliers® modelo 283D/20F). A partir de estos datos, se determinó la composición y estructura del arbolado, su Área Basal (AB) y el Carbono en Biomasa Arbórea (CBA), para lo cual se aplicaron ecuaciones alométricas específicas de bosques templados del centro y norte de México (Aguirre-Calderón & Jiménez Pérez, 2011; Bolaños et al., 2017) (ecuaciones 1 y 2).

$$Quercus rugosa: B = (0.1033)(DN^{2.39}) \quad (1)$$

$$Pinus pseudostrobus: B = 0.3518 \times DN^2 \quad (2)$$

Donde:

$B$  = Biomasa

$DN$  = Diámetro normal (cm)

Se estimó el almacén de carbono edáfico ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) a 100 cm de profundidad; se consideró el  $COS$ , la  $DA$  y el espesor de la capa de suelo y se aplicó un factor de conversión estándar de  $MOS$  (Materia Orgánica del Suelo) a  $COS$  de 0.5 (Etchevers *et al.*, 2005).

Mediante pruebas estadísticas descriptivas, se evaluó la variabilidad de las propiedades edáficas y los reservorios de carbono para establecer su distribución y comportamiento con respecto a la profundidad. Los análisis de correlación permitieron identificar relaciones significativas entre las variables empleadas, y se destacaron patrones clave para comprender la dinámica de almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales. Los análisis estadísticos se efectuaron con el *software* PASW versión 18.0 (Statistical Package for the Social Sciences Inc. [SPSS], 2009).

## **Resultados**

### **Caracterización de la cobertura vegetal**

La descripción general de los sitios de estudio se muestra en el Cuadro 1. El sitio BP-R1 (Bosque de Pino Reforestado), con edad de 11 años se ubica en un área de recreación. El tipo de mantillo que sobreyace al primer horizonte mineral corresponde a un Moder, caracterizado por poseer subhorizontes orgánicos de espesor mayor a 25 cm a causa de la ralentización en la descomposición de las acículas de pino.

**Cuadro 1.** Caracterización de sitios muestreados en el Parque Estatal El Ocotal, Estado de México, México.

<b>Punto</b>	<b>BP-R1</b>	<b>BQ/VSA</b>	<b>BP-R2</b>	<b>BP-R3</b>	<b>ZR</b>	
Año de reforestación	2008, 2022	ND	2003	2012, 2022	2022	
Altitud (msnm)	2 770	2 786	2 750	2 770	2 770	
Pendiente (%)	<1	17.8	0	<1	2	
Mantillo	Moder	Mull	Mull	Moder	NA	
Especie dominante	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Quercus rugosa</i> Neé	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	NA	
Estructura del estrato arbóreo						
<i>DAP</i> (cm)	5-10	85	11	0	14	7
	10-30	3	43	47	26	0
	30-50	11	13	32	5	0
	>50	2	0	1	2	0
Total de individuos en 400 m <sup>2</sup>	101	67	80	47	7	
Área basal (m <sup>2</sup> ) en 400 m <sup>2</sup>	2.20	2.55	5.77	2.60	0.00076	
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	55.10	63.63	144.23	65.08	0.02	

BP-R1 = Bosque de Pino Reforestado 1; BQ/VSA = Bosque de Encino con Vegetación Secundaria Arbórea; BP-R2 = Bosque de Pino Reforestado 2; BP-R3 = Bosque de Pino Reforestado 3; ZR = Zona Recreativa; ND = No disponible; NA = No aplica. Moder = Horizonte orgánico con espesor de 2 a 8 cm, descomposición de hojarasca lenta; Mull = Horizonte orgánico de poco espesor o ausente.

El sitio BQ/VSA (Asociación de encino con vegetación secundaria) posee una capa orgánica superficial de escaso espesor (Mull), con tasa de descomposición de los restos orgánicos más alta que para el Moder. La cubierta forestal está dominada por

individuos de *Quercus rugosa*, con escasos ejemplares de *Arbutus xalapensis* Kunth. Se detectaron algunos rasgos particulares al sitio, los más evidentes son la presencia, aunque escasa, de plantas epífitas, indicios de erosión hídrica laminar y en surcos.

El sitio BP-R2 (Reforestación con *Pinus pseudostrobus*) tiene una edad aproximada de 20 años. La capa superficial del suelo está cubierta por acículas en un espesor de 15 a 25 cm, con escaso grado de descomposición y horizonte de fermentación imperceptible (Moder). Se observaron evidencias de perturbación ocasionadas por brechas, con una compactación moderada del suelo; su profundidad efectiva es inferior a 70 cm.

El sitio BP-R3 con reforestación de *Pinus pseudostrobus* y *P. montezumae* es una masa forestal con una antigüedad mayor a 20 años. El mantillo mide 5 cm de profundidad y lo forman pastos y acículas de pino. El último sitio, en una zona recreativa (ZR), carece de cobertura vegetal y el suelo está compactado por el paso de visitantes y vehículos.

En lo referente a la estructura de las comunidades forestales, en BP-R1 la más reciente reforestación se acompaña de árboles aislados con  $DAP > 30$  cm que protegen a las plántulas recién incorporadas. Son escasos los árboles con  $DAP$  entre 10 y 30 cm, lo que indica espaciamiento en la reforestación y eliminación de árboles enfermos. Se considera que BQ/VSA es un remanente de la vegetación original prevaleciente en la región, carece de árboles con  $DAP > 50$  cm, predominan los ejemplares entre 10 y 30 cm y hay plántulas de encino. En BP-R2 dominan árboles con  $DAP$  entre 30 y 50 cm, mientras que en BP-R3 predominan los de 10 a 30 cm.

## **Caracterización física y química de los suelos**

Si bien en la capa superficial de los suelos del PEEO predominan clases texturales medias y gruesas, resulta importante establecer el patrón de acumulación de las arcillas por ser la fracción mineral que permite la formación de compuestos

organominerales que a mediano y largo plazo confieren estabilidad al carbono almacenado (Rodríguez et al., 2019). En función de los procesos pedogenéticos dominantes de eluviación-iluviación de minerales secundarios (arcillas y óxidos de hierro), se distingue un primer grupo representado por el sitio BP-R1 en el que se observa el incremento de arcillas a mayor profundidad, lo cual denota la formación de un horizonte argílico a partir de los 30 cm (Cuadro 2). El segundo grupo lo forman los sitios BQ/VSA, BP-R3 y ZR; en estos suelos no se registró la existencia de un horizonte de acumulación de arcillas al menos en los primeros 100 cm de profundidad. El tercer grupo corresponde al sitio BP-R2 donde los suelos mantienen contenidos de arcillas superiores a 30 % en toda profundidad y se encuentra en las partes bajas del parque.

**Cuadro 2.** Propiedades físicas de los suelos de los sitios de estudio del Parque Estatal El Ocotal, Estado de México, México.

<b>Sitio</b>	<b>Prof.</b> cm	<b>Are</b>	<b>Lim</b>	<b>Arc</b> %	<b>DA</b>	<b>Poros</b>
BP-R1	1	69.0 (10.5)	20.3 (6.9)	10.7 (3.6)	0.8 (0.1)	52.2 (2.7)
	2	53.7 (2.5)	23.8 (9.8)	22.5 (8.1)	0.9 (0.1)	54.0 (7.6)
	3	45.9 (4.3)	23.8 (4.0)	30.3 (1.3)	1.0 (0.1)	42.3 (23.6)
BQ/VSA	1	48.8 (3.5)	36.7 (2.5)	14.5 (1.0)	0.8 (0.1)	58.7 (4.7)
	2	53.8 (3.0)	32.5 (1.3)	13.7 (3.5)	0.9 (0.1)	51.9 (7.5)
	3	52.0 (3.9)	31.6 (5.6)	16.4 (1.7)	1.0 (0.0)	49.2 (0.5)
BP-R2	1	38.3 (5.3)	30.1 (1.8)	31.6 (6.2)	1.02 (0.0)	47.5 (2.6)
	2	47.6 (24.8)	20.0 (5.9)	32.4 (21.9)	1.07 (0.1)	47.5 (1.5)

	3	49.2 (14.1)	20.6 (4.2)	30.2 (18.4)	1.0 (0.0)	48.9 (0.4)
BP-R3	1	56.7 (8.3)	27.0 (6.5)	16.3 (2.6)	0.8 (0.1)	54.6 (8.0)
	2	51.4 (16.4)	23.5 (1.0)	25.1 (16.1)	0.9 (0.1)	54.5 (3.7)
	3	61.7 (4.7)	21.3 (1.7)	17.0 (3.7)	1.1 (0.1)	48.4 (3.3)
ZR	1	50.6 (5.4)	31.1 (5.3)	18.3 (2.4)	0.84 (0.0)	53.9 (4.4)
	2	46.5 (8.1)	31.3 (3.4)	22.2 (7.9)	0.9 (0.1)	55.6 (2.1)
	3	63.6 (5.3)	17.7 (4.1)	18.7 (2.2)	1.1 (0.1)	50.3 (1.2)

Prof. = Profundidad 1:0-20 cm, 2:20-50 cm y 3:50-100 cm; Are = Arenas; Lim = Limos; Arc = Arcillas; *DA* = Densidad Aparente; Poro = Porosidad. BP-R1 = Bosque de Pino Reforestado 1; BQ/VSA = Bosque de Encino con Vegetación Secundaria Arbórea; BP-R2 = Bosque de Pino Reforestado 2; BP-R3 = Bosque de Pino Reforestado 3; ZR = Zona Recreativa. \* = Datos de superficie. Los datos entre paréntesis se refieren a la desviación estándar.

Los valores de *DA*, *DR* y porosidad en los sitios, excepto en BP-R2 (cuya clase textural difiere), indican mayor compactación y reducción del espacio poroso con la profundidad, lo que tiende a disminuir la capacidad de desalojar agua, especialmente en la temporada de lluvias. La porosidad en todos los suelos y profundidades es superior a 50 %, excepto en BP-R2 (47.5 %), donde predominan los poros medianos y finos (0.2-50 micras).

Los valores de pH (Cuadro 3) muestran una tendencia moderadamente ácida en el horizonte superficial, que se aproxima a la neutralidad en profundidad. No obstante, esta condición no debiera ser limitante para la movilidad de los macro y micronutrientes.

**Cuadro 3.** Propiedades químicas de los suelos de los sitios de estudio del Parque Estatal El Ocotál, Estado de México, México.

Sitio	Prof. cm	pH		COS	N	P	K	CIC
		H <sub>2</sub> O	KCl	%		mg kg <sup>-1</sup>		meq 100 g
BP-R1	1	6.0 (0.5)	4.9 (0.3)	3.7 (1.8)	1.0 (1.0)	2.0 (1.0)	4.5 (1.7)	22.5 (2.8)
	2	6.3 (0.1)	5.3 (0.3)	1.3 (0.8)	1.0 (0.0)	1.0 (0.0)	4.0 (0.0)	
	3	6.5 (0.2)	5.0 (0.1)	0.5 (0.2)	3.0 (1.0)	4.0 (1.0)	11.2 (1.2)	
BQ/VSA	1	6.6 (0.3)	5.4 (0.4)	2.1 (2.3)	3.0 (3.0)	4.0 (4.0)	9.5 (9.4)	30.2 (6.1)
	2	6.4 (0.4)	5.2 (0.2)	0.4 (0.1)	1.0 (1.0)	2.0 (1.0)	4.7 (3.0)	
	3	7.0 (0.1)	5.9 (0.3)	0.4 (0.1)	1.0 (1.0)	2.0 (1.0)	1.5 (2.1)	
BP-R2	1	6.1 (0.2)	4.6 (0.3)	1.3 (0.7)	4.0 (2.0)	5.0 (3.0)	12.2 (7.2)	17.5 (2.0)
	2	6.3 (0.1)	4.7 (0.2)	1.3 (0.9)	5.0 (2.0)	7.0 (3.0)	17.0 (7.1)	
	3	6.2 (0.1)	4.6 (0.2)	0.3 (0.1)	7.0 (3.0)	10.0 (4.0)	23.0 (8.4)	
BP-R3	1	6.0 (0.2)	4.7 (0.3)	1.7 (1.4)	1.0 (1.0)	2.0 (1.0)	4.7 (3.0)	21.7 (5.5) *
	2	6.3 (0.1)	5.4 (0.6)	0.6 (0.3)	1.0 (1.0)	2.0 (1.0)	11.5 (13.3)	
	3	6.3 (0.2)	5.1 (0.4)	0.9 (0.8)	2.0 (1.0)	3.0 (1.0)	7.7 (3.7)	
ZR	1	6.4 (0.1)	4.9 (0.1)	0.9 (0.5)	1.0 (1.0)	2.0 (1.0)	5.5 (2.6)	23.2 (3.8)
	2	6.4 (0.2)	4.9 (0.1)	0.5 (0.4)	2.0 (1.0)	3.0 (2.0)	6.7 (3.8)	
	3	6.4 (0.2)	5.1 (0.3)	0.4 (0.3)	2.0 (1.0)	3.0 (2.0)	7.0 (3.9)	

Prof. = Profundidad 1:0-20 cm, 2:20-50 cm y 3:50-100 cm; pH = Potencial de Hidrógeno; KCl = Cloruro de potasio; COS = Carbono Orgánico del Suelo; CIC =

Capacidad de Intercambio Catiónico; Nt = Nitrógeno total; P = Fósforo asimilable; K = Potasio; meq 100 g = Miliequivalentes por cada 100 g de suelo. BP-R1 = Bosque de Pino Reforestado 1; BQ/VSA = Bosque de Encino con Vegetación Secundaria Arbórea; BP-R2 = Bosque de Pino Reforestado 2; BP-R3 = Bosque de Pino Reforestado 3; ZR = Zona Recreativa. Los datos entre paréntesis se refieren a la desviación estándar.

El *COS* disminuye con la profundidad, y BP-R1 es el sitio con el mayor contenido (5.5 %). Este valor no se correlaciona directamente con la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio; en contraste, BQ/VSA presenta valores superiores para estos indicadores. La baja disponibilidad de *COS* y macronutrientes en ZR coincide con el escaso aporte de restos orgánicos. BQ/VSA destaca por tener la *CIC* más alta del sistema.

Los almacenes de carbono en el suelo y la biomasa arbórea se muestran en el Cuadro 4. En todos los sitios, excepto en ZR donde la cobertura forestal es escasa, la mayor reserva de carbono está en la biomasa arbórea, con valores entre 123.4 y 329.8 Mg ha<sup>-1</sup>. Dicha variación se debe a la proporción de individuos con *DAP* de 30 a 50 cm por sitio. En BQ/VSA, destacan los árboles de reemplazo natural en este segmento, ausentes en los otros sitios.

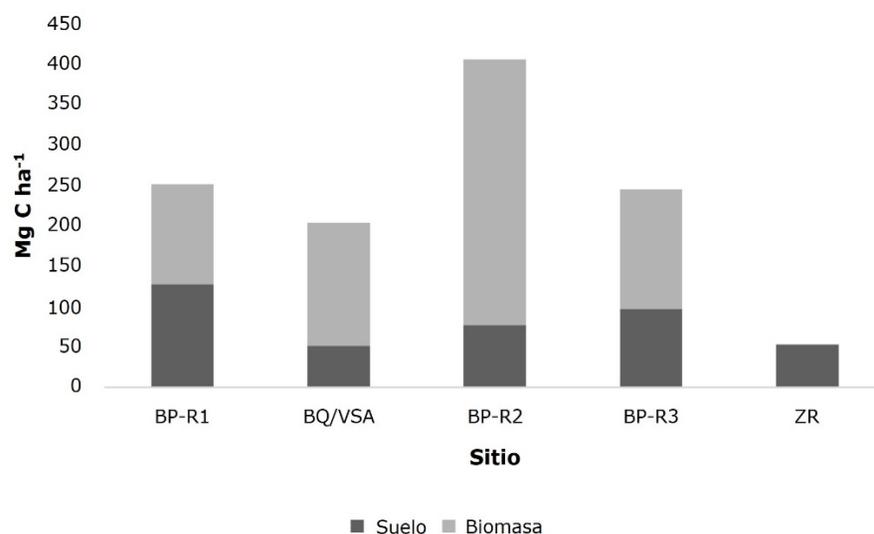
**Cuadro 4.** Almacenes de carbono en biomasa y suelo (Mg ha<sup>-1</sup>).

	<b>BP-R1</b>	<b>BQ/VSA</b>	<b>BP-R2</b>	<b>BP-R3</b>	<b>ZR</b>
Mg C ha <sup>-1</sup>					
<i>CBA</i>					
<i>DAP</i> (cm)					
0-10	1.0	1.8	0	2.9	0
10-30	3.9	52.8	102.1	27.0	0
30-50	82.9	98.0	206.4	28.8	0
>50	35.6	0	21.2	89.3	0
Subtotal	123.4	152.7	329.8	147.9	0
<i>COS</i> (cm)					

0-20	62.0 (32.5)	29.9 (31.0)	26.7 (14.5)	29.4 (25.9)	14.7 (8.8)
20-50	37.7 (21.2)	13.5 (4.0)	42.2 (31.7)	18.4 (10.4)	13.5 (11.5)
50-100	28.4 (13.3)	7.8 (3.7)	8.0 (3.4)	49.4 (40.9)	24.9 (17.1)
Subtotal	128.1	51.2	76.9	97.3	53.2
<i>COT</i>	251.5	203.9	406.7	245.2	53.2

*CBA* = Carbono en Biomasa Arbórea; *COS* = Carbono Orgánico del Suelo; *COT* = Carbono Orgánico Total; Mg C ha<sup>-1</sup> = Megagramos de carbono por hectárea. BP-R1 = Bosque de Pino Reforestado 1; BQ/VSA = Bosque de Encino con Vegetación Secundaria Arbórea; BP-R2 = Bosque de Pino Reforestado 2; BP-R3 = Bosque de Pino Reforestado 3; ZR = Zona Recreativa. Los datos entre paréntesis se refieren a la desviación estándar.

La reserva de carbono en el suelo fluctuó entre 51.2 y 128.1 Mg ha<sup>-1</sup>. BQ/VSA mostró el valor más bajo, influido por la rápida descomposición de hojarasca y erosión. Es importante establecer que entre 30 y 50 % del *COS* se localiza en los primeros 20 cm de profundidad, lo cual indica la importancia de conservar esta capa superficial. Con base en la totalidad del carbono almacenado en el sistema suelo-vegetación, la conformación de los almacenes puede ser variable: en BP-R2, 81 % del carbono se concentra en la biomasa, y alcanza la mayor reserva de *COT* con 406.7 Mg ha<sup>-1</sup>, en tanto que en BP-R3 solo corresponde a 60 %. En contraste, en ZR la totalidad del almacén de carbono se ubica en el suelo (53.2 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 3).



**Figura 3.** Comparativo de los almacenes de carbono en biomasa arbórea vs. suelo, Parque Estatal El Ocotal, Estado de México, México.

## Discusión

En respuesta a la creciente pérdida de integridad de la cubierta vegetal dentro del parque, las campañas de reforestación han propiciado la introducción de especies no nativas que coexisten con los remanentes de encinares ubicados en los lomeríos cónicos; esto ha dado lugar a una transición de bosque de encino y encino-pino a pino en las partes medias y bajas del sistema (Rosaliano *et al.*, 2022; Torres, 2021).

El estudio sobre la estructura de las comunidades forestales detecta diferencias en su conformación, derivadas de las recurrentes campañas de repoblamiento para sustituir individuos muertos o enfermos, tal y como se aprecia en los sitios BP-R1 y BP-R3. Una consecuencia directa de los cambios en la composición vegetal es la alteración de los ciclos biogeoquímicos, especialmente del carbono (Rodríguez *et al.*, 2019), debido a que las tasas de descomposición y calidad de la materia orgánica se reducen en esta transición, condición que se observa en la composición y espesor del mantillo

del suelo al pasar de bosque de encino (Mull) a pino (Moder); similar a lo expuesto por Chertov y Nadporozhskaya (2018) en la transición de bosques caducifolios a perennifolios en diferentes regiones bioclimáticas del mundo.

El análisis de la textura de los suelos a 100 cm reveló la presencia de tres patrones, definidos por la relación entre la proporción de arcillas, la porosidad y la densidad del suelo, que tienen implicaciones directas sobre el almacén de carbono edáfico, pero también en el desempeño hídrico de los suelos; esto favorece la reducción de la conductividad hidráulica en la medida en que se incrementa el contenido de arcillas y la proporción de poros finos. Tal situación se manifiesta, principalmente, en las zonas de menor pendiente, propicias para la acumulación de arcillas, como es el caso de los sitios BP-R1 y BP-R2. Los análisis químicos indican que, en términos generales, la disponibilidad de nutrientes y *CIC* es media baja en todos los sitios, a excepción de BP-R2 que es consistentemente mayor, incluso hasta los 50 cm de profundidad, lo que podría relacionarse con mayores tasas de crecimiento de la vegetación.

En la biomasa arbórea se registró el mayor almacenamiento para BP-R2 (329.76 Mg C ha<sup>-1</sup>). Comparado con los otros sitios de estudio, acumuló entre 2.2 y 2.7 veces más carbono. Estas diferencias se atribuyen a la alta densidad de individuos con *DAP* entre 10 y 50 cm que representan la totalidad del estrato arbóreo, pero no podría descartarse, como se indica previamente, su relación con mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo registrada.

Los almacenes de carbono en biomasa arbórea y suelo fueron contrastados con estudios similares de diferentes regiones y condiciones climáticas de México (Cuadro 5). Así, por ejemplo, Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) en una comunidad forestal del norte de México, con una edad similar de las plantaciones con las del estudio aquí descrito, se estableció que el contenido de *CBA* para el PEEO en los sitios BP-R1, BP-R2 y BP-R3, es entre 3 y 4 veces mayor a los sitios del estudio referido. Comparativamente, al estudio realizado en bosques de *Pinus pseudostrobus* en la Sierra Norte de Oaxaca (Leyva-Pablo et al., 2021), el almacén de *CBA* en el PEEO en

el sitio BP-R1, es 1.9 veces menor. Las diferencias en ambas comparaciones se atribuyen a las condiciones climáticas imperantes; entre ellas la precipitación media anual, pues en Nuevo León es de 430 mm, mientras que en el PEEO es de 800 mm y en Oaxaca de 1 100 mm anuales. Un tercer estudio, desarrollado por Cano-Flores et al. (2020) dentro de la misma región bioclimática del PEEO, refirió para el ANP El Faro una reserva de *CBA* tres veces inferior a la obtenida en el presente estudio. En este caso, la diferencia radica en la baja densidad promedio de individuos arbóreos (227 contra 1 400 del PEEO), lo cual es atribuible a la intensificación de las prácticas de manejo y conservación que se han realizado dentro del PEEO durante los últimos cuarenta años, auspiciadas por su decreto de ANP estatal.

**Cuadro 5.** Comparativo de almacenes de carbono en biomasa arbórea y suelo en zonas forestales de México.

<b>Vegetación</b>	<b>Biomasa</b>	<b>Suelo</b>	<b>Total</b>	<b>Fuente</b>
		Mg C ha <sup>-1</sup>		
Bosque de Pino-Encino	383.9	47.3	431.2	Leyva-Pablo et al. (2021)
	71.7	53.8*	125.6	Cano-Flores et al. (2020)
Bosque de Encino-Pino	-	164.3	164.3	Vargas-Larreta et al. (2023)
	66.6	98.3*	164.9	Cano-Flores et al. (2020)
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	37.0 <sup>1</sup>	-	52.5	Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011)
	95.0 <sup>2</sup>	-	95.0	
	30.0 <sup>3</sup>	-	105.9	
	238.2	30.4**	268.6	Leyva-Pablo et al. (2021)
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	-	76	76	Cruz-Flores y Etchevers-Barra (2011)
<i>Pinus</i> spp.	123.4 <sup>1</sup>	128.1	251.5	Este estudio (PEEO)
	329.8 <sup>2</sup>	76.9	406.7	
	147.9 <sup>3</sup>	97.3	245.2	
<i>Quercus</i> spp.	50.5	101.7*	152.2	Cano-Flores et al. (2020)
	199.1	48.7**	247.8	Leyva-Pablo et al. (2021)
<i>Quercus</i> spp.	152.7	51.2	203.9	Este estudio (PEEO)

<sup>1</sup> = Dato de 15 años con altura promedio de 16 m; <sup>2</sup> = Dato de 20 años con altura promedio de 21 m; <sup>3</sup> = Dato de 13 años con altura promedio de 16 m. \* = COS:0-20 cm; \*\* = COS:0-30 cm.

Los almacenes de *COS* tuvieron fluctuaciones dentro de los diferentes sitios, siendo significativamente mayor en BP-R1, en contraste a BQ/VSA. Lo anterior, se explica, principalmente, por los procesos de ladera como la erosión hídrica laminar, la presencia o ausencia de los horizontes orgánicos superficiales y el sellamiento del suelo producto del tránsito de vehículos y visitantes. Como dato importante, se destaca que, para todos los sitios, entre 30 y 50 % del almacenamiento de *COS* se concentra en los primeros 20 cm de profundidad, por lo que la reducción o eliminación de esta capa superficial implica una pérdida sustancial en las reservas de carbono y la disponibilidad de nutrientes necesarios para el desarrollo vegetal; por ello, se considera necesario focalizar aquellas áreas donde se detectaron indicios de erosión para implementar acciones de restauración de suelos.

Aun cuando los datos del presente estudio indican que las reforestaciones con pino tienen la mayor producción de biomasa y, en consecuencia, acumulan más carbono, también debe considerarse que estos sitios tienden a ser menos biodiversos y susceptibles a plagas y enfermedades (Gillerot et al., 2021).

Al establecer un comparativo sobre la estructura y composición entre las comunidades vegetales estudiadas, se puede inferir que, a diferencia de las plantaciones de pino, los encinares aún conservan parte de su integridad y autorregeneración debido al análisis de la estructura arbórea en la que se registraron, condición que está amenazada por la excesiva carga de visitantes, los procesos erosivos en el suelo y la fragmentación espacial; esto implica cambios microclimáticos y en la composición de las comunidades vegetales y biota del suelo, similar a lo expuesto por Pérez et al. (2013) y Canteiro et al. (2018).

## **Conclusiones**

Los procesos históricos de ocupación del territorio dentro del Parque Estatal El Ocotál han determinado cambios en la estructura y composición de las comunidades vegetales, lo cual incide sobre la capacidad de almacenamiento de carbono tanto en la biomasa arbórea, como en el suelo. La transición de comunidades vegetales de encino a pino tiene implicaciones sobre la disponibilidad y calidad de los nutrientes en el suelo debido, en parte, a la reducción de las tasas de descomposición de la materia orgánica acumulada en el mantillo del suelo. Los mayores reservorios de carbono se ubican en la biomasa arbórea, con valores entre 123 y 330 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que en el suelo se registran entre 51 y 128 Mg ha<sup>-1</sup>; la reforestación con *Pinus pseudostrobus* de 20 años evidencia la mayor capacidad de almacenamiento de carbono orgánico total con 406 Mg ha<sup>-1</sup> y en la que hay la densidad más alta de individuos con *DAP*>30 cm. Entre 30 y 50 % del *COS* se localiza en los primeros 50 cm de profundidad, por lo que la carencia de las capas superficiales del suelo implica una pérdida de sustancias de los almacenes de carbono edáfico. Se considera de gran importancia no solo estimar los contenidos de carbono, sino también comprender el estado actual de dichos reservorios basados en el análisis de las propiedades y procesos que involucran su incorporación y permanencia en los sistemas forestales.

## **Agradecimientos**

La presente investigación fue posible gracias al apoyo recibido de Conahcyt al Proyecto 321572 "Fortalecimiento de las capacidades del Laboratorio de Ciencias Ambientales FAPUR-UAEMéx para la atención de problemas ambientales en comunidades rurales de la región central del Estado de México".

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### **Contribución por autor**

Carola Mendoza Aparicio: trabajo en campo, laboratorio, elaboración y corrección del escrito en las diferentes etapas de revisión; Gustavo Álvarez Arteaga: revisión y corrección del manuscrito en las diferentes etapas; Miguel Martínez Tapia: trabajo en campo, elaboración de manuscrito; María Antonieta Reyes Zuazo: trabajo en laboratorio y revisión de manuscrito.

### **Referencias**

- Afanador-Barajas, L. N., Coca P., D. A., Vargas G., A. F., Bautista M., M. F., Mendoza H., A., y Vallejo Q., V. E. (2020). Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia Forestal*, 23(1), 35-50. <https://doi.org/10.14483/2256201X.14856>
- Aguirre-Calderón, O. A., y Jiménez-Pérez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 73-84. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i6.575>
- Álvarez-Arteaga, G., Ibáñez-Huerta, A., Orozco-Hernández, M. E., y García-Fajardo, B. (2020). Regionalización de indicadores de calidad para suelos degradados por actividades agrícolas y pecuarias en el altiplano central de México. *Quivera, Revista de Estudios Territoriales*, 22(2), 5-19. <https://doi.org/10.36677/qret.v22i2.13302>
- Andrés-Abellán, M., Wic-Baena, C., López-Serrano, F. R., García-Morote, F. A., Martínez-García, E., Picazo, M. I., Rubio, E., Moreno-Ortego, J. L., Bastida-López, F.,

- & García-Izquierdo, C. (2019). A soil-quality index for soil from Mediterranean forests. *European Journal of Soil Science*, 70(5), 1001-1011. <https://doi.org/10.1111/ejss.12798>
- Arriola P., V. J., Estrada M., E., Ortega-Rubio, A., Pérez M., R., y Gijón H., A. R. (2014). Deterioro en áreas naturales protegidas del centro de México y del Eje Neovolcánico Transversal. *Investigación y Ciencia*, 60, 37-49. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67431160005.pdf>
- Bolaños G., Y., Bolaños G., M. A., Paz P., F., y Ponce P., J. I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i1.243>
- Canedoli, C., Ferrè, C., El Khair, D. A., Comolli, R., Liga, C., Mazzucchelli, F., Proietto, A., Rota, N., Colombo, G., Bassano, B., Viterbi, R., & Padoa-Schioppa, E. (2020). Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*, 44, Article 101135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>
- Cano-Flores, O., Vela-Correa, G., Acevedo-Sandoval, O. A., y Valera-Pérez, M. Á. (2020). Concentraciones de carbono orgánico en el arbolado y suelos del área natural protegida El Faro en Tlalmanalco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 895-905. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.757>
- Canteiro, M., Córdova-Tapia, F., & Brazeiro, A. (2018). Tourism impact assessment: A tool to evaluate the environmental impacts of touristic activities in Natural Protected Areas. *Tourism Management Perspectives*, 28, 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2018.09.007>
- Chavarría O., Y., Martínez G., A. L., Ortiz C., E., y Goyenechea, I. (2019). Evolución en la selección de áreas protegidas en el continente americano: el caso de Estados Unidos, México y Costa Rica. *Boletín Científico del Instituto de Ciencias Básicas e Ingenierías*, 7(13), 47-53. <https://doi.org/10.29057/icbi.v7i13.3433>
- Chertov, O. G., & Nadporozhskaya, M. A. (2018). Humus forms in forest soils: Concepts and classifications. *Eurasian Soil Science*, 51, 1142-1153. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100022>

- Cruz-Flores, G., y Etchevers-Barra, J. D. (2011). Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45(8), 849-862. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v45n8/v45n8a1.pdf>
- Etchevers B., J. D., Monreal, C. M., Hidalgo M., C., Acosta M., M., y Padilla C., J. (2005). *Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas*. Colegio de Posgraduados. <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UCR.000624421/Details>
- Geographic Resources Analysis Support System. (2022). GRASSGIS, Bringing advanced geospatial technologies to the world (Version 3.22) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://grass.osgeo.org/>
- Gillerot, L., Grussu, G., Condor-Golec, R., Tavani, R., Dargush, P., & Attorre, F. (2021). Progress on incorporating biodiversity monitoring in REDD+ through national forest inventories. *Global Ecology and Conservation*, 3K2, Article e01901. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01901>
- Gobierno del Estado de México. (1999). *Programa de Manejo del Parque Natural de Recreación Popular El Ocotal*. Secretaría de Ecología, Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna y Universidad Autónoma del Estado de México-Facultad de Geografía.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2016*. INEGI. [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/AEGPEF\\_2016/702825087357.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGPEF_2016/702825087357.pdf)
- Leyva-Pablo, T., de León-González, F., Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Ponce M., A. y Fuentes-Ponce, M. H. (2021). Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742421. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742421>
- Medina-Castro, Y. E., Roldán-Clarà, B., y Leyva A., J. C. (2019). Impactos del turismo en dos Parques Nacionales y áreas aledañas de Baja California, México: el caso de Sierra de San Pedro Mártir y Constitución de 1857. *Sociedad y Ambiente*, 7(19), 165-

194.

<https://revistas.ecosur.mx/sociedadambiente/index.php/sya/article/view/1940>  
NOM-021-RECNAT-2000. (2001, 14 de agosto). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, Segunda Sección, de 31 de diciembre de 2002.

<https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>

Pérez L., P., López B., F., García O., F., Cuevas-Reyes, P., y González-Rodríguez, A. (2013). Procesos de regeneración natural en bosques de encinos: factores facilitadores y limitantes. *Biológicas*, 1, 18-24.

<https://www.biologicas.umich.mx/index.php?journal=biologicas&page=article&op=view&path%5B%5D=148&path%5B%5D=pdf>

Pérez R., C., Zizumbo, L., y González V., M. (2009). Impacto ambiental del turismo en áreas naturales protegidas; procedimiento metodológico para el análisis en el Parque Estatal El Ocotol, México. *El Periplo Sustentable*, (16), 25-56.

<https://rperiplo.uaemex.mx/article/view/5038/3628>

Rodríguez B., P. C., González R., H., Cantú S., I., Pando M., M., Marmolejo M., J. G., Gómez M., M. V., y Lazcano C., J. (2019). Modelos de degradación de la hojarasca en bosques de encino y de pino en Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55), 39-55. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.548>

Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, O. A., Hernández-Ortiz, J., & Manzur-Chávez, N. (2022). Carbon storage during the development stages of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in the Sierra Alta of Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 483-497.

<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009>

Rosaliano E., R., Ávila-Akerberg, V., Franco-Maass, S., Valencia A., S., y López M., L. A. (2022). Estructura y diversidad arbórea en bosques de encino del centro de México. *Madera y Bosques*, 28(2), Artículo e2822449.

<https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822449>

Siebe, C., Jahn, R., y Stahr, K. (2016). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (3<sup>ra</sup> Ed.). Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

<https://es.scribd.com/document/686053151/Manual3Siebe-1>

Statistical Package for the Social Sciences Inc. (2009). PASW Statistics for Windows (Version 18.0.) [Software]. SPSS Inc. <https://www.ibm.com/support/pages/how-cite-ibm-spss-statistics-or-earlier-versions-spss>

Torres R., J. M. (2021). Factores ambientales y físicos que afectan la supervivencia de siete especies forestales en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 66-91. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.831>

van Reeuwijk, L. P. (Comp.). (2002). *Procedures for soil analysis*. International Soil Reference and Information Centre. [https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC\\_TechPap09.pdf](https://www.isric.org/sites/default/files/ISRIC_TechPap09.pdf)

Vargas-Larreta, B., Amezcua R., M., López-Martínez, J. O., Cueto-Wong, J. A., Cruz-Cobos, F., Nájera-Luna, J. A., & Aguirre-Calderón, C. G. (2023). Estimating soil organic carbon stocks in three temperate forest types in Durango, México. *Botanical Sciences*, 101(1), 90-101. <https://doi.org/10.17129/botsci.3094>

Wang, L., Guo, J., Liu, X., Li, K., Ma, L., Tian, Y., Wang, J., Zhang, Q., Tian, Y., Li, C., & Lu, M. (2023). Assessment of soil quality in an arid and barren mountainous of Shandong province, China. *Scientific Reports*, 13, Article 19966.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-46136-6>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.