



Efecto del gradiente altitudinal y variables climáticas en el almacenamiento de carbono en un bosque templado de Chihuahua, México

Effect of altitudinal gradient and climate variables on carbon storage in a temperate forest of Chihuahua, Mexico

Samuel Alberto García-García¹, Eduardo Alanís-Rodríguez^{*}, Oscar Alberto Aguirre Calderón¹,
Eduardo Javier Treviño Garza¹, Luis Gerardo Cuellar-Rodríguez¹ y Alejandro Collantes-Chávez-Costa²

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Linares, Nuevo León, México.

² Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Campus Cozumel. Cozumel, Quintana Roo, México.

^{*} Autor de correspondencia.
eduardo.alanisrd@uanl.edu.mx

RESUMEN

Los bosques son reservorios de carbono que contribuyen a mitigar los efectos del calentamiento global, sin embargo, dicho almacenamiento puede variar en un gradiente altitudinal. El objetivo del presente estudio fue analizar la relación del gradiente altitudinal y el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea y de carbono orgánico del suelo en un bosque templado del estado de Chihuahua. Se establecieron aleatoriamente 37 sitios de 1000 m², distribuidos en tres pisos altitudinales (m s.n.m): 1: 2200 - 2600, 2: 2601 - 2800 y 3: 2801 - 3200. En cada piso altitudinal se registraron las especies arbóreas y se midió el diámetro normal ≥ 7.5 cm y la altura total; además, se anidaron en cada sitio dos parcelas de 1 m² para la colecta de herbáceas y regeneración. Se obtuvieron muestras de suelo a 0 cm - 25 cm y 25 cm - 50 cm de profundidad. El contenido de carbono arbóreo se estimó mediante ecuaciones alométricas y densidad de la madera; para la regeneración y herbáceas se tomó una concentración de carbono de 0.5 a partir de muestras secas; el carbono orgánico del suelo se determinó con el método Walkley and Black. Las especies con mayor carbono acumulado fueron *Pseudotsuga menziesii* (19.89 Mg ha⁻¹), *Quercus sideroxyla* (11.61 Mg ha⁻¹) y *Abies durangensis* (22.24 Mg ha⁻¹) para los pisos 1, 2 y 3 respectivamente. Los pisos altitudinales tuvieron una composición similar y no presentaron diferencias significativas en el contenido de C total. La altitud y precipitación presentaron una correlación positiva con el contenido de carbono.

PALABRAS CLAVE: arbolado, biomasa, CO₂, gradiente altitudinal, suelo, regeneración.

ABSTRACT

Forests are carbon reservoirs that contribute to mitigating the effects of global warming; however, such storage can vary along an altitudinal gradient. The objective of this study was to analyze the relationship between the altitudinal gradient and the carbon content stored in standing vegetation and soil organic carbon in a temperate forest in the state of Chihuahua. Thirty-seven sites of 1000 m² were randomly established, distributed in three altitudinal floors: 1: 2200 - 2600, 2: 2600 - 2801 and 3: 2801 - 3200 m a.s.l. In each one, the tree species were recorded, and the normal diameter ≥ 7.5 cm and the total height were measured; In addition, two 1 m² plots were nested in each site where herbaceous plants and regeneration were collected. Soil samples were extracted at 0-25 and 25-50 cm depth. Tree carbon content was estimated using allometric equations and wood density; for regeneration and herbaceous plants, a carbon concentration of 0.5 was taken from dry samples; soil organic carbon was determined using the Walkley and Black method. The species with the highest accumulated carbon were *Pseudotsuga menziesii* (19.89 Mg ha⁻¹), *Quercus sideroxyla* (11.61 Mg ha⁻¹) and *Abies durangensis* (22.24 Mg ha⁻¹) for floors 1, 2 and 3 respectively. The altitudinal floors had a similar composition and did not present significant differences in the total C content. Altitude and precipitation presented a positive correlation with carbon content.

KEYWORDS: woodland, biomass, CO₂, altitudinal gradient, soil, regeneration.

INTRODUCCIÓN

Los gases de efecto invernadero (GEI) están presentes en la atmósfera y en grandes concentraciones contribuyen al calentamiento global (Compañía Española de Petróleos [Cepsa], 2015). Como señalan Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por sus siglas en inglés] y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [Pnuma], (2020) las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) representan la mayoría de las emisiones totales de GEI que, para el año 2019, alcanzaron un nivel de 38 Gt CO_2e ($\pm 1,9$ Gt CO_2e). Se han observado impactos en los sistemas naturales y humanos como consecuencia del calentamiento global, además, muchos ecosistemas terrestres y algunos de los servicios que proveen han cambiado debido al calentamiento global (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés], 2018). Los bosques juegan un papel importante en el ciclo global del carbono y la regulación del sistema climático global ya que cubren alrededor de 31% del planeta y almacenan cerca de 45% del carbono terrestre, el sistema suelo-vegetación tiene relación con el aumento o disminución de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera (Bonan, 2008; FAO-Pnuma, 2020; van Breemen y Feijtel, 1990).

Los cambios en las variables climáticas a lo largo del gradiente altitudinal influyen en la composición y productividad de la vegetación; consecuentemente afectan la cantidad y el recambio de materia orgánica del suelo (MOS), así como el balance hídrico y erosión del suelo (Garten et al., 1999; Tan et al., 2004; Quideau et al., 2001). La biomasa aérea desempeña un papel importante en la cuantificación de los almacenes de dióxido de carbono y su potencia para secuestrar C depende del tipo de bosque y su etapa sucesional, la calidad de sitio, la edad, el régimen de manejo, la composición de especies y el contenido de C en los compartimentos de cada especie (Pardos, 2010; Zhang et al., 2017). En relación con el almacenamiento de carbono en el suelo, tanto la cantidad total almacenada como los patrones espaciales del carbono orgánico en ecosistemas de gran altitud siguen siendo en gran medida inciertos debido

a la alta heterogeneidad espacial. Por lo tanto, se necesita desarrollar más investigaciones que aborden aspectos como la profundidad del suelo, su textura y los diversos usos del suelo para comprender mejor estos patrones (Acosta-Mireles et al., 2022; Garnett et al., 2001; Liu et al., 2006; Yang et al., 2007). Algunos estudios similares realizados a lo largo de gradientes altitudinales contemplan que, a medida que se asciende, los valores de precipitación incrementan y por lo tanto el almacenamiento de carbono también, lo anterior acompañado de un descenso de la temperatura (Charan et al., 2012; Mogollón et al., 2015; Solano et al., 2018). Si bien en México se han realizado diversos estudios de cuantificación de carbono (Barrales-Brito et al., 2020; Ríos Camey et al., 2021; Cano-Flores et al., 2020; García et al., 2020; Morales-Inocente et al., 2020; Avellan Rivera et al., 2020), estos no contemplan la relación existente entre el carbono almacenado en los bosques y su relación con variables ambientales o gradientes altitudinales. Con base en la dominancia observada de ciertas familias a lo largo del gradiente altitudinal en el área de estudio, en el presente estudio se planteó la hipótesis de que posiblemente el contenido de carbono en el suelo y en los diferentes estratos arbóreos no presentará diferencias significativas entre los pisos altitudinales.

OBJETIVOS

Determinar la cantidad de C almacenado en la biomasa aérea del estrato arbóreo, de regeneración y herbáceo, así como del suelo en un bosque de coníferas a lo largo de un gradiente altitudinal (2200 m - 3200 m), con tres pisos de altura (piso 1: 2200 - 2600, piso 2: 2601 - 2800 y piso 3: 2801 - 3200) m s.n.m. y su relación con la altitud, precipitación y temperatura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área natural protegida (ANP) con la categoría Área de Protección de Flora y Fauna (APPF) Cerro Mohinora (Fig. 1) se encuentra ubicada dentro de la *región terrestre prioritaria*



El área de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, en la subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses y comprende 9126 ha con altitudes entre los 2100 m y los 3307 m, fue declarada ANP en 2015, debido a la diversidad de

ecosistemas y el papel ecológicamente importante para la región, ya que es el área de mayor captación de precipitación pluvial en el estado (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2017). El área se caracteriza por contar con bosques de coníferas sin perturbación, con bosques de *Abies – Picea*, *Abies – Pseudotsuga*, *Pinus – Quercus* y *Quercus – Pinus* (Conanp, 2017). Tal como señala el Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], (2016), los suelos presentes en el área de estudio son Leptosol, Phaeozem, Calcisol, Solonchak y Regosol.

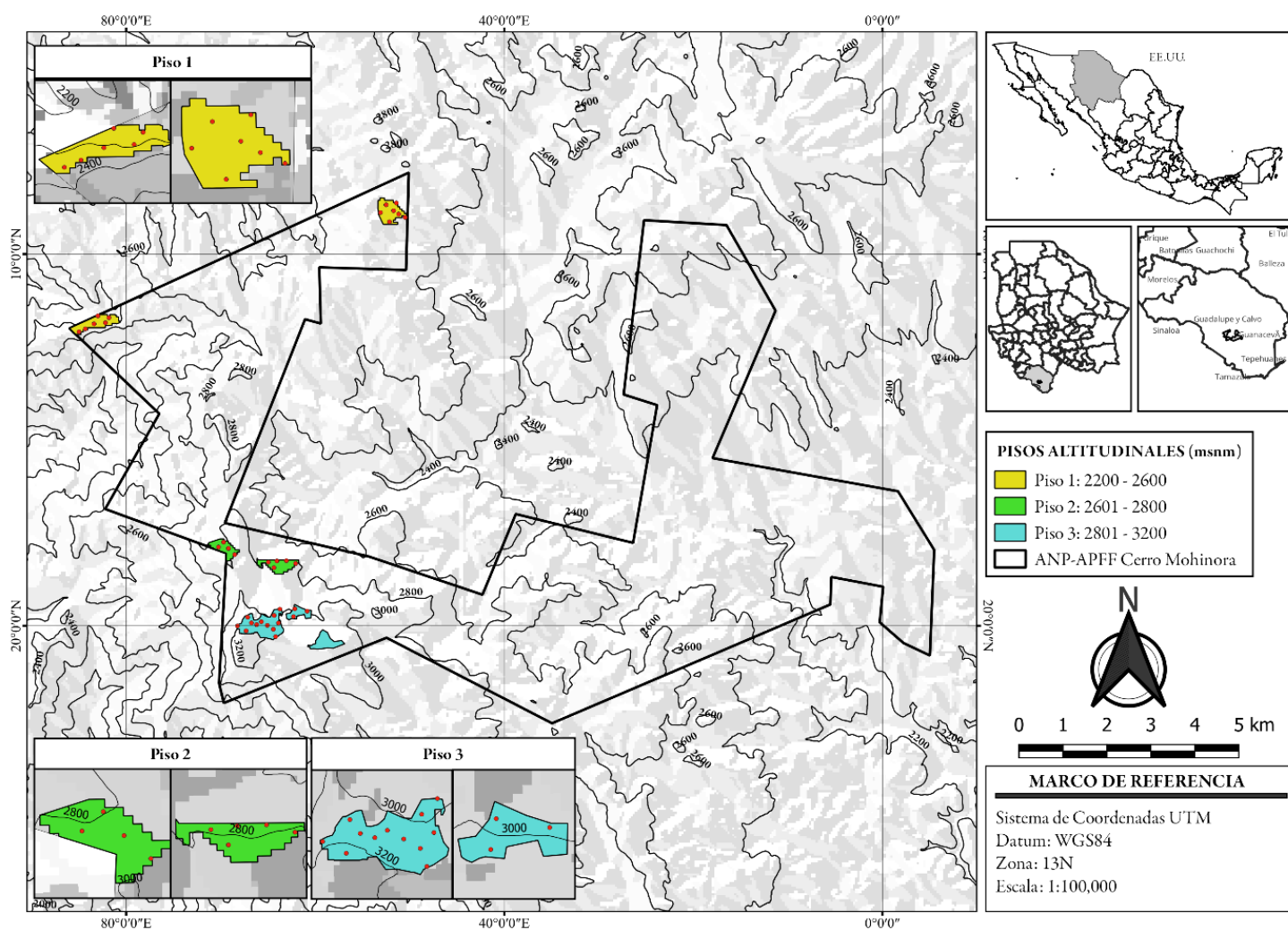


FIGURA 1. Mapa de ubicación del ANP Cerro Mohinora y distribución de los sitios de muestreo por piso altitudinal.

Método

Toma de datos. Se establecieron aleatoriamente 37 sitios de 1000 m² para el levantamiento de información, distribuidos en tres pisos altitudinales de exposición norte; piso 1: 2200 m – 2600 m (13 sitios), piso 2: 2600 m – 2800 m (9 sitios) y piso 3: 2800 m – 3200 m (15 sitios). Además, se anidaron en cada uno, dos parcelas de muestreo de 1 m² ubicadas al norte y sur de cada sitio circular; en ellas se colectó todo el material vegetal proveniente de herbáceas y regeneración (no se encontraron arbustos). El número de sitios de 1000 m² se determinó con una intensidad de muestreo de 2.5%, aplicado exclusivamente a rodales seleccionados dentro del ANP. La elección de estos rodales se llevó a cabo considerando la rodalización de los tipos de vegetación, la altitud para contemplar el mayor gradiente posible y la operatividad del desarrollo del muestreo (Conanp, 2017).

Para el estrato arbóreo se consideraron individuos con diámetro normal (DN) medido a 1.30 metros del suelo ($d_{1.30} \geq 7.5$ cm; además se registró la altura total en metros (h) y la especie de cada individuo. Adicionalmente, se realizó la extracción de muestras de suelo en cada uno de los sitios a dos intervalos de profundidad (0 cm - 25 cm y 25 cm - 50 cm); en total, se recolectaron 2 muestras compuestas (una por intervalo de profundidad), cada una integrada por la mezcla de cuatro submuestras para garantizar una mayor representatividad. Además, se tomaron ocho muestras simples inalteradas (cuatro por intervalo de profundidad) por sitio, estas muestras se utilizaron para determinar la densidad aparente del suelo mediante el método gravimétrico (Yañez et al., 2019). Finalmente, se obtuvo un total de 48 muestras compuestas y 192 muestras simples.

Las muestras simples se extrajeron inalteradas, insertando en el suelo un nucleador cilíndrico como indica la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2002), luego se colocaron en bolsas de plástico con su correspondiente identificación.

Densidad aparente. Se calculó por medio el método gravimétrico (Woerner, 1989), utilizando la ecuación 1. Las muestras fueron secadas en estufa a 105 °C durante 24 horas con la finalidad de obtener el peso seco.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{p2-p1}{Vc} \quad (1)$$

donde:

$p2$ = peso seco de la muestra con el cilindro (g)

$p1$ = peso del cilindro (g)

Vc = volumen del cilindro (cm³)

Volumen, biomasa y contenido de carbono arbóreo. El cálculo del volumen se realizó mediante la fórmula de volumen total árbol con corteza (Vta_{cc} ; Ecuación 2) y los parámetros propuestos, mostrados en la tabla 1.

$$Vta_{cc} = b_0 * d^{b1} * h^{b2} + b_3 * d^2 \quad (2)$$

donde:

d = diámetro normal del árbol i (cm)

h = altura total del árbol i (m)

b_i = parámetros propuestos

La biomasa se determinó como el producto del volumen de cada individuo por la densidad de la madera de cada una de las especies (Tabla 1) y la cantidad de individuos (N ha⁻¹) evaluados. Después se estimó el contenido de carbono al multiplicar el valor de la biomasa por la concentración de carbono 0.5 (Eggleston et al., 2006; Ordóñez et al., 2008).

Biomasa y contenido de C del estrato herbáceo y regeneración. El material vegetal colectado en cada uno de los estratos fue secado en estufa durante 24 horas a 65 °C hasta alcanzar un peso constante de la biomasa. El contenido de carbono (mg ha⁻¹) se estimó también tomando en cuenta la concentración de carbono 0.5 (NGGIP, 2006; Ordóñez et al., 2008).



TABLA 1. Parámetros del modelo para la estimación de volumen de las especies evaluadas para el ANP Cerro Mohinora y densidad de su madera.

Especie	Parámetros*				Densidad (g/cm ³)	Fuente
	b0	b1	b2	b3		
<i>Abdu</i>	0.000066	1.788316	1.055175	0.000013	0.38	Sotomayor (2008)
<i>Jude</i>	0.000591	1.338876	0.707074	0.000029	0.46	Nájera-Luna & García-Ramírez (2009)
<i>Psme</i>	0.000062	1.882421	0.946587	0.00001	0.45	Zanne (2009)
<i>Piay</i>	0.000082	2.102772	0.606456	0.000054	0.37	Vázquez-Cuecuecha et al. (2015)
<i>Piar</i>	0.000067	1.783568	1.098266	0.000063	0.43	Sotomayor (2015)
<i>Qusi</i>	0.000188	1.851694	0.572656	0.000044	0.61	de la Paz Pérez y Dávalos (2008)
<i>Pidu</i>	0.000085	1.995095	0.764492	0.00005	0.47	Silva-Arredondo y Návar-Cháidez (2012)
<i>Arxa</i>	0.000142	1.483474	1.121788	0.000116	0.75	Ordóñez et al. (2015)
<i>Potr</i>	0.000005	1.79749	1.13183	0.00004	0.45	Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2008)
<i>Quru</i>	0.000188	1.851694	0.572656	0.000044	0.78	Conafor (2008)
<i>Qufu</i>	0.000188	1.851694	0.572656	0.000044	0.78	Conafor (2008)
<i>Pien</i>	0.000061	1.992235	0.869354	0.000057	0.42	Sotomayor (2015)
<i>Arar</i>	0.000142	1.483474	1.121788	0.000116	0.75	Ordóñez et al. (2015)
<i>Pieng</i>	0.000054	2.21213	0.615217	0.000046	0.44	Salazar y Alemán (2002)

* Fuente: Navar (2016).

Abdu = *Abies durangensis* Martínez, *Jude* = *Juniperus deppeana* Steud, *Psme* = *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Piay* = *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltdl, *Piar* = *Pinus arizonica* Engelm, *Qusi* = *Quercus sideroxyla* Bonpl, *Pidu* = *Pinus durangensis* Martínez, *Arxa* = *Arbutus xalapensis* Kunth, *Potr* = *Populus tremuloides* Michx, *Quru* = *Quercus rugosa* Née, *Qufu* = *Quercus fulva* Liebm, *Pien* = *Picea engelmannii* Parry ex Engelm, *Arar* = *Arbutus arizonica* (A.Gray) Sarg y *Pieng* = *Pinus engelmannii* Carr.

Contenido de carbono orgánico (COS). Se evaluó con base en la materia orgánica, mediante el método Walkley y Black (León y Aguilar, 1987). El carbón orgánico se oxidó con una solución estándar de K₂Cr₂O₇ en presencia de H₂SO₄ concentrado, condiciones estándar de la reacción; y el exceso de dicromato fue titulado con una solución estándar de FeSO₄, mediante el uso de la difenilamina sulfonato de bario como indicador. Posterior a haber calculado el

porcentaje de carbono del suelo y su densidad, se empleó la ecuación 3 (Delgadillo y Quechulpa, 2006):

$$CS = CC * DA * P \quad (3)$$

donde:

CS= cantidad de carbono en el suelo (mg ha⁻¹)

CC= porcentaje de carbono (%)

DA= densidad aparente (g/cm³)

P= profundidad de muestreo (cm)

Variables climáticas. Los datos de las variables climáticas de temperatura (°C) y precipitación (mm) se obtuvieron de la base de datos climáticos generada por Cuervo-Robayo et al. (2014) en la cual se tomó en cuenta un periodo de 99 años (1910 – 2009) para generar capas de 19 variables bioclimáticas a una resolución espacial de 90 m. Dichas capas se manipularon en el software Qgis 2.18.28. La determinación de la precipitación se realizó directamente, a través de la ubicación de los sitios en la capa obtenida y la correspondencia con el valor del volumen de lluvia calculado en milímetros. La temperatura se trabajó de la misma forma, mediante el uso de la capa de temperatura máxima y la de mínima, las cuales se promediaron para obtener un valor medio en cada uno de los sitios de muestreo.

Análisis de datos. Para comparar el contenido de C de los estratos arbóreo, herbáceo y de regeneración entre pisos altitudinales, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con un nivel de significancia de 5%. Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Posteriormente se determinó la influencia de la altitud (m s.n.m.), precipitación (mm) y temperatura (°C), se realizó el cálculo del coeficiente correlación de Pearson para determinar la relación existente entre las variables climáticas y el almacenamiento de carbono (C); los análisis estadísticos se llevaron a cabo en el paquete estadístico InfoStat 2020.

RESULTADOS

Volumen, biomasa y contenido de carbono arbóreo. Se observó que para el piso altitudinal 1, *Quercus sideroxyla*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus engelmannii* fueron las especies que más aportaron en volumen, biomasa y contenido de carbono arbóreo, mientras que los géneros *Quercus* y *Pinus* fueron los que más aportaron en estas tres variables; en el piso 2 las especies que más contribuyeron en el contenido de carbono arbóreo son *Pseudotsuga menziesii*, *Abies durangensis* y *Pinus durangensis*, por género *Pseudotsuga* y *Pinus*

fueron los más distintivos en cuanto a volumen, biomasa y contenido de carbono arbóreo; mientras que para el piso 3 *Abies durangensis*, *Pseudotsuga menziesii* y *Populus tremuloides* tuvieron los mayores valores, asimismo los géneros *Abies* y *Pseudotsuga* fueron los de mayor aporte (Tabla 2).

De manera general, el piso 1 presentó un volumen total de 208.76 m³ ha⁻¹, el piso 2 de 221.40 m³ ha⁻¹, mientras que el piso 3 logró los 247.71 m³ ha⁻¹ (Tabla 2). Respecto a la biomasa, los pisos 1, 2 y 3 consiguieron 112.22 Mg ha⁻¹, 95.63 Mg ha⁻¹, y 102.40 Mg ha⁻¹ respectivamente (Tabla 2). Referente al contenido de carbono, el piso 1 presentó 56.11 Mg ha, el piso 2 alcanzó 47.81 Mg ha, mientras que el piso 3 logró 51.20 Mg ha (Tabla 2). El análisis de varianza mostró que no existen diferencias entre volumen ($F = 0.21$; $P = 0.8140$), biomasa ($F = 0.21$; $P = 0.8140$) y contenido de carbono ($F = 0.57$; $P = 0.5725$) de los tres pisos altitudinales.

Contenido de C del estrato herbáceo y de regeneración.

La cantidad de C acumulado en el estrato herbáceo para el piso 1 correspondió a 0.000074 Mg ha⁻¹, por su parte el piso 2 fue de 0.000107 Mg ha⁻¹, mientras que el piso 3 presentó 0.000024 Mg ha⁻¹. La evaluación de la regeneración mostró que los pisos 1, 2 y 3 acumulan 0.000074 Mg ha⁻¹, 0.000107 Mg ha⁻¹ y 0.000068 Mg ha⁻¹ de carbono, respectivamente. No se encontraron diferencias del contenido de carbono en el estrato herbáceo ($F = 0.57$; $P = 0.6187$) y de regeneración ($F = 2.56$; $P = 0.2243$) entre los pisos altitudinales.

Contenido de C orgánico (COS). En este sentido, el piso 1, para la profundidad 0 cm - 25 cm, presentó un promedio de 129.37 Mg ha⁻¹ ($\sigma = 76.20$ Mg ha⁻¹), el piso 2 muestra un valor de 136.09 Mg ha⁻¹ ($\sigma = 62.41$ Mg ha⁻¹), mientras que el piso 3 reflejó un total 161.55 Mg ha⁻¹ ($\sigma = 42.78$ Mg ha⁻¹); por su parte la profundidad 25 cm a 50 cm promedió 85.44 Mg ha⁻¹ ($\sigma = 56.92$ Mg ha⁻¹), 119.96 Mg ha⁻¹ ($\sigma = 25.17$ Mg ha⁻¹), y 147.80 Mg ha⁻¹ ($\sigma = 49.58$ Mg ha⁻¹) para los pisos 1, 2 y 3, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas para las profundidades 0 cm - 25 cm y 25 cm - 50 cm ($F = 0.50$; $P = 0.6149$ y $F = 2.88$; $P = 0.0783$, respectivamente).



TABLA 2. Valores totales de volumen, biomasa y contenido de carbono de pisos altitudinales en el ANP Cerro Mohinora, en Guadalupe y Calvo, Chihuahua.

Piso	Especie	Volumen ($m^3 ha^{-1}$)	Biomasa ($Mg ha^{-1}$)	Carbono ($Mg ha^{-1}$)
1 QP	<i>Quercus sideroxyla</i>	32.36	23.21	11.61
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	31.23	14.05	7.03
	<i>Pinus engelmannii</i>	30.79	13.55	6.77
	<i>Pinus arizonica</i>	30.55	13.13	6.57
	<i>Pinus durangensis</i>	23.38	10.99	5.49
	<i>Quercus rugosa</i>	11.72	9.14	4.57
	<i>Quercus fulva</i>	10.38	8.09	4.05
	<i>Arbutus xalepensis</i>	6.41	4.81	2.4
	<i>Quercus crassifolia</i>	4.96	3.87	1.94
	<i>Pinus ayacahuite</i>	9.75	3.61	1.8
	<i>Alnus acuminata</i>	7.93	3.57	1.78
	<i>Abies durangensis</i>	6.38	2.42	1.21
	<i>Arbutus arizonica</i>	1.48	1.11	0.55
	<i>Juniperus deppeana</i>	1.47	0.67	0.34
Subtotal		208.77	112.22	56.11
2 PsPi	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	88.41	39.79	19.89
	<i>Abies durangensis</i>	51.18	19.45	9.73
	<i>Pinus durangensis</i>	36.34	17.08	8.54
	<i>Pinus ayacahuite</i>	23.7	8.77	4.38
	<i>Pinus arizonica</i>	16.63	7.15	3.58
	<i>Quercus fulva</i>	1.47	1.14	0.57
	<i>Quercus rugosa</i>	1.09	0.85	0.43
	<i>Populus tremuloides</i>	1.31	0.59	0.29
	<i>Arbutus xalepensis</i>	0.67	0.5	0.25
	<i>Juniperus deppeana</i>	0.4	0.18	0.09
	<i>Quercus sideroxyla</i>	0.19	0.12	0.06
Subtotal		221.4	95.63	47.81
3 AbPs	<i>Abies durangensis</i>	117.03	44.47	22.24
	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	46.36	20.86	10.43
	<i>Populus tremuloides</i>	30.71	13.82	6.91
	<i>Picea engelmannii</i>	27.35	11.49	5.74
	<i>Pinus arizonica</i>	11.92	5.13	2.56
	<i>Pinus durangensis</i>	8.2	3.85	1.93
	<i>Pinus ayacahuite</i>	3.21	1.19	0.59
	<i>Quercus sideroxyla</i>	1.83	1.11	0.56
	<i>Pinus arizonica</i>	0.99	0.43	0.21
	<i>Juniperus deppeana</i>	0.13	0.06	0.03
Subtotal		247.72	102.4	51.2
Total		677.89	310.25	155.13

*1 QP = Piso 1 *Quercus* - *Pinus* (2200 m – 2600 m s.n.m.), 2 PsPn = Piso 2 *Pseudotsuga* y *Pinus* (2601 m – 2800 m s.n.m.), 3 AbPs = Piso 3 *Abies* - *Pseudotsuga* (2801 m – 3200 m s.n.m.).

Carbono total acumulado. En general, la altitud con mayor contenido de carbono total fue la de 2800 m – 3200 m con 360.55 Mg ha⁻¹; seguido por el piso de 2600 m – 2800 m con 303.86 Mg ha⁻¹; y el piso de 2200 m – 2600 m fue el que menor contenido de C presentó con 270.92 Mg ha⁻¹. No se detectaron diferencias significativas entre los tres pisos ($H = 23.00$; $P = 0.4608$).

El porcentaje de carbono total acumulado en los diferentes estratos para el piso 1 tuvo 20.71% en el estrato arbóreo y 79.29% en el suelo; el piso 2 fue 15.73% en el estrato arbóreo y el estrato suelo resultó con un 84.27%; finalmente, el piso 3 presentó 14.20% para el arbolado y 85.80% en el carbono orgánico concentrado en el suelo. El estrato herbáceo y el de regeneración no lograron reflejar ni 1% de carbono en comparación con los demás estratos.

Relación entre las reservas de carbono total y las variables ambientales

El almacenamiento del carbono mostró una correlación positiva y estadísticamente significativa, tanto con la altitud ($r = 0.72$, $P < 0.001$), como con el valor medio de la temperatura ($r = -0.75$, $P < 0.001$), aunque esta última fue negativa. Para el caso de la primera (Fig. 2A), se considera una relación de moderada a fuerte, mientras que para la segunda (Fig. 2B), se interpreta como negativa de moderada a fuerte (Cuellar et al., 2018).

Con respecto a la relación entre el almacenamiento del carbono y la precipitación (Fig. 2C), se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($r = 0.39$, $P > 0.001$); esta relación puede ser considerada débil (Cuellar et al., 2018).

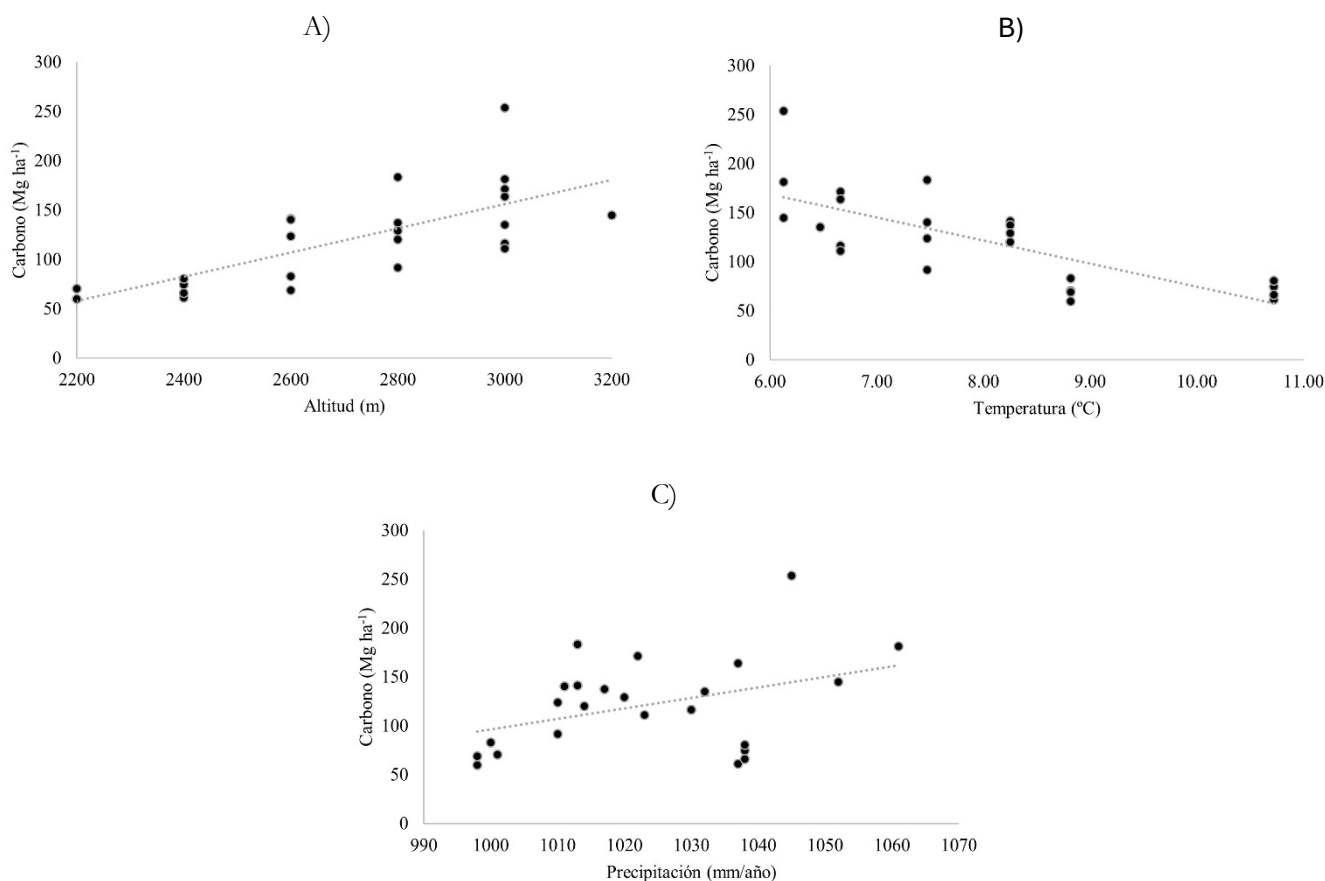


FIGURA 2. Relación entre el carbono total de los sitios de muestreo con la altitud (A), temperatura media anual (B) y la precipitación media anual (C) del Cerro Mohinora, Guadalupe y Calvo, Chihuahua.



DISCUSIÓN

Volumen, biomasa y contenido de carbono arbóreo.

Según el volumen calculado para los tres pisos altitudinales, este fue superior a lo registrado en bosques con composición similar (*Pinus* y *Pinus* – *Quercus*) por Hernández-Salas et al. (2018), quienes evaluaron bosques templados del estado de Chihuahua en diferentes periodos (1986: 143.82 m³ ha⁻¹, 1996: 189.20 m³ ha⁻¹ y en 2006: 183.12 m³ ha⁻¹) y similares a los evaluados por Graciano-Ávila et al. (2020) en un bosque templado del estado de Durango, donde estimaron un volumen de 246 m³ ha⁻¹.

Las diferencias en volumen pueden atribuirse a los cambios en las dimensiones del arbolado a lo largo del gradiente altitudinal, puesto que, conforme aumenta la altitud, se observa una mayor densidad del arbolado de géneros como *Pseudotsuga*, *Abies* y *Picea*, los cuales han sido documentados con alturas y diámetros mayores (García et al., 2020; Wehenkel et al., 2022) comparados con *Pinus* y *Quercus* mayormente abundantes en los pisos 1 y 2.

Los valores obtenidos de biomasa aérea para el piso 1 (*Quercus* – *Pinus*) fueron menores a los registrados por Graciano-Ávila et al. (2019), quienes registraron un total de 130.28 Mg ha⁻¹ para un bosque de *Pinus* – *Quercus* en el estado de Durango. También, Bolaños et al. (2017) obtuvieron un valor mayor (237 t ha⁻¹) para un bosque de oyamel en el Estado de México contrastado con los pisos altitudinales 2 (*Pseudotsuga* – *Pinus*) y 3 (*Abies* – *Pseudotsuga*) de esta investigación. El almacenamiento y distribución de la biomasa puede estar influenciado por diversos factores como el desarrollo del rodal, edad, calidad del sitio, composición de especies, variables ambientales, densidad del rodal y prácticas silvícolas aplicadas (Figueroa-Navarro et al., 2010; Rodríguez-Ortiz et al., 2012; Soriano-Luna et al., 2015).

La similitud en la composición de especies en los tres pisos altitudinales contrasta con la variabilidad fisiográfica que influye significativamente en la acumulación de biomasa. A medida que la altitud aumenta, las condiciones ambientales cambian, lo que conlleva a modificaciones en

la estructura de la comunidad, incluyendo la dominancia de ciertas especies (Murga-Orrillo et al., 2021; Romahn-Hernández et al., 2020). Estos cambios pueden resultar en variaciones de la biomasa aérea.

A pesar de presentar el menor volumen calculado, el piso 1 exhibió la mayor concentración de carbono en la biomasa aérea. Este hallazgo contradice las observaciones de estudios anteriores (Charan et al., 2012; Chávez-Gándara et al., 2017; Mogollón et al., 2015; Solano et al., 2018), que sugieren que el almacenamiento de carbono tiende a aumentar con la altitud debido al incremento en la precipitación. En el presente estudio, este patrón se invirtió; el piso 1 estuvo dominado por especies del género *Quercus*, cuya madera tiene una densidad mayor en comparación con las especies de *Pinus*, según señala Ordoñez et al. (2015). Esto resultó en una mayor biomasa y contenido de carbono en este piso altitudinal. No se encontraron diferencias significativas en volumen, biomasa y contenido de carbono arbóreo, posiblemente porque el gradiente está dominado por las mismas familias, compartiendo muchas de las especies; lo que da pie a deducir que la biomasa y el contenido de carbono, tienen correlación con la altitud y la temperatura, pero dependen más de la densidad de la madera.

Contenido de C del estrato herbáceo y de regeneración.

Bosques con asociaciones entre *Pinus* – *Abies* – *Quercus* en Tlaxcala no superaron los 2 Mg ha⁻¹ de carbono para los estratos de herbáceas y arbustos en conjunto, excepto *Pinus* – *Quercus* – hojosas, donde registraron 6 Mg ha⁻¹ (Acosta-Mireles et al., 2009); por otro lado, en Durango, Morales-Inocente (2020) señala que para bosques templados la captura de carbono en el estrato herbáceo fue de 0.16 Mg ha⁻¹, sin embargo, estos valores fueron mayores a lo calculado en este trabajo para cada uno de los pisos altitudinales. Según lo indicado por Schall et al. (2018) y Bugno-Pogoda et al. (2021), la variación en la densidad y diversidad de herbáceas puede atribuirse al sistema de manejo forestal aplicado al bosque y a los cambios estacionales que afectan su composición.

La acumulación de carbono en la regeneración fue similar para las tres altitudes evaluadas, ya que obtuvieron 0.000107 Mg ha⁻¹, 0.000074 Mg ha⁻¹ y 0.000068 Mg ha⁻¹ en los pisos 1, 2 y 3, respectivamente. Montes de Oca-Cano et al. (2012) mencionan resultados mayores (0.001 Mg ha⁻¹) en regeneración de 16 años evaluada bajo diferentes modelos. Las diferencias en el carbono capturado en la regeneración pueden deberse al grado de densidad en que se encuentre el dosel Acosta-Mireles et al. (2009).

Contenido de C orgánico (COS). Se estima que, en el primer metro de suelo, la reserva de COS almacenado es de 1500 Pg, lo cual supone más carbono que el contenido en la atmósfera (800 Pg) y la vegetación terrestre (500 Pg) combinados (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por sus siglas en inglés] y Grupo Técnico Intergubernamental sobre Suelos [ITPS, por sus siglas en inglés], 2015).

Diversos autores mencionan que el suelo es el depósito de carbono más importante en los ecosistemas terrestres y, en México, concentra hasta un tercio de los GEI totales del uso del suelo, cambio de uso del suelo y la silvicultura (Acosta-Mireles et al., 2009; de Jong et al., 2010). Lo anterior coincide con lo observado este estudio, ya que el suelo fue el de mayor porcentaje de carbono almacenado.

No hubo diferencias entre los pisos altitudinales, ni en la comparación de profundidades de muestreo, esto puede ser porque la composición de especies a lo largo del gradiente es similar, lo que conlleva a que la materia orgánica presente en el suelo sea semejante. De esta manera, se ha señalado que la producción de materia orgánica y su descomposición son determinantes para la adición de C al suelo y la distribución relativa de este en los perfiles se ve influenciada por la distribución aérea y subterránea de la vegetación (Buurman et al., 2008; Jobbágy y Jackson, 2000; Pastor y Martínez, 2009). También, Galicia et al. (2016) indican que el contenido de carbono del suelo de bosques templados difiere ampliamente entre los tipos de suelo, la identidad de la especie vegetal dominante, el estadio sucesional y la edad del suelo.

El carbono acumulado en el piso 1 presentó valores mayores a los descritos por Acosta-Mireles et al. (2009) para profundidades similares (0 cm - 20 cm = 65.3 Mg ha⁻¹; 21 cm - 40 cm = 44.4 Mg ha⁻¹) en un bosque de características semejantes del estado de Tlaxcala; también, Cano-Flores et al. (2020) calcularon un promedio menor (53.84 Mg ha⁻¹) al aquí alcanzado para las dos profundidades, lo anterior en un bosque de *Pinus - Quercus* en el Estado de México. De igual manera, Bolaños et al. (2017) presentaron un valor menor (68 Mg ha⁻¹) de contenido de carbono al aquí expresado para los pisos 2 y 3 en las dos profundidades en un bosque de *Abies religiosa* del Estado de México. Por otro lado, Pérez-Ramírez et al. (2013) estimaron un promedio de 153 Mg ha⁻¹ en suelos de los rodales conservado de *Abies* en el Estado de México, siendo un valor afín a lo obtenido aquí en la primera profundidad de los tres pisos altitudinales.

Es difícil precisar el porqué de las diferencias entre estudios porque puede depender de factores limitantes como la producción primaria neta y la composición de especies del ecosistema, así como de factores climáticos como la temperatura, humedad y sus cambios a través del tiempo; factores reductores como la erosión, la deforestación y el uso del suelo; lo anterior aunado al origen del material parental, composición mineral del suelo, pendiente y orientación de ladera, además de las características físicas del suelo como la textura, profundidad, densidad aparente, fragmentos de roca, drenaje y grado de erodabilidad (Fisher, 2000; Kirschbaum, 2000; Lal, 2005; Robert, 2001; Sanchez et al., 2004).

Carbono total acumulado. A pesar de que en los tres pisos altitudinales estudiados no se presentaron diferencias significativas entre sí mismos, se observó una cantidad de carbono total ascendente de acuerdo con la altitud, comportamiento documentado en diversos bosques del mundo (Álvarez-Arteaga et al., 2013; Dieleman et al., 2013; Girma et al., 2014; Thokchom y Yadava, 2017).

Lo anterior puede ser por el nivel de conservación de los pisos 2 y 3, ya que estos se encuentran en la zona de preservación del área de protección de flora y fauna



(APFF), mientras que el piso 1 es parte de la zona de aprovechamiento sustentable (Conanp, 2017) y la erosión de la capa superior del suelo conduce a una disminución de las reservas de nutrientes y carbono orgánico, lo que influye en la fertilidad de este (European Environment Agency [EEA, por sus siglas en inglés], 2017). Swift (2001) indica que el potencial de secuestro de carbono del suelo depende de las características químicas de la materia orgánica y su capacidad para resistir la descomposición microbiana, mientras que el carbono acumulado en la biomasa muestra variabilidad según la especie y el tejido del árbol (Francis, 2000; Gifford, 2000).

Relación entre las reservas de C total y las variables medioambientales. La acumulación de carbono aumentó en conformidad con la altitud, este comportamiento se ha registrado en trabajos similares de cuantificación de carbono (Mogollón et al., 2015; Solano et al., 2018; Parras et al., 2015). En esta investigación se observó que, conforme la altitud es mayor, también lo es la precipitación, la cual tiene una correlación positiva con el almacenamiento de carbono, además esto acompañado de un descenso de la temperatura media.

Por otro lado, se menciona que en altitudes mayores se presenta menor temperatura y mayor precipitación, la descomposición de la materia orgánica es más lenta (Charan et al., 2012; Zhang et al., 2012), lo anterior favorece la producción de biomasa vegetal (Schimel et al., 1994), pues la disponibilidad de humedad en el suelo tiene alta influencia en la acumulación de reservas de carbono (Mogollón et al., 2015). Respecto a la temperatura, se observa una correlación negativa en la cual, a mayor temperatura, menor acumulación de carbono, coincidiendo con Charan et al. (2012), quienes mencionan que la respiración del suelo disminuye con el aumento de la altitud, lo que lleva a una reducción de la pérdida de carbono. Este fenómeno puede explicarse gracias a que, tanto la materia orgánica del suelo como la diversidad y actividad de los organismos del suelo se ven afectados por la temperatura, esto define el grado en que el suelo puede brindar servicios (EEA, 2017) como el almacenamiento de carbono.

CONCLUSIONES

La cantidad de carbono acumulado en el estrato arbóreo fue mayor en *Quercus sideroxyla*, *Pseudotsuga menziesii* y *Abies durangensis* para los pisos 1, 2 y 3 respectivamente, destacando la presencia de *Pseudotsuga menziesii* en las tres altitudes como una especie principal captadora de carbono. El piso 1 exhibió la mayor acumulación de carbono en el estrato arbóreo debido a la dominancia de especies con mayor densidad de madera. En contraste, el contenido de carbono en el estrato herbáceo y de regeneración fue bajo, posiblemente influenciado por la época de muestreo. En cuanto al suelo, la profundidad de 0 m - 25 m acumuló la mayor cantidad de carbono a lo largo del gradiente altitudinal. La acumulación total de carbono aumentó con la altitud, posiblemente debido al estado de conservación de los pisos 2 y 3; y la relación entre altitud y precipitación sugiere una influencia positiva en la acumulación de carbono en zonas frías y de mayor precipitación, como los pisos 2 y 3. Se reconoce la necesidad de una mayor especificidad en la relación entre las variables ambientales y el contenido de carbono, lo que podría ser abordado en futuras investigaciones para mejorar la comprensión de los procesos de acumulación y distribución de carbono en estos ecosistemas. En conclusión, el área natural protegida Cerro Mohinora no solo tiene un papel crucial en la captación de precipitación en la región, sino que también actúa como un importante reservorio de carbono, contribuyendo significativamente a la reducción de los gases de efecto invernadero y la mitigación de los efectos del calentamiento global en los bosques templados del estado de Chihuahua.

RECONOCIMIENTOS

Al personal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp)-Dirección Regional Norte y Sierra Madre Occidental por el apoyo brindado para la realización de este estudio en el Área de Protección de Flora y Fauna Cerro Mohinora en Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1297/1512https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1297/1512>
- Acosta-Mireles, M., Paz-Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2022). Patrones de distribución a profundidad del carbono orgánico del suelo en diferentes usos del suelo y manejo. *Terra Latinoamericana*, 40, e1321A. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1321>
- Álvarez-Arteaga, G., García-Calderón, N. E., Krasilnikov, P., & García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171-180. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1010>
- Arriaga, L., Espinoza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Avellan Rivera, A. R., Barreto Dolin, E., & Peralta Tercero, E. J. (2020). Carbono en biomasa aérea, sistema agroforestal de *Theobroma cacao* L. Laboratorio Natural, Los Laureles 2018. *Revista Universitaria del Caribe*, 24(1), 98-106. <https://doi.org/10.5377/ruc.v24i01.9914>
- Barrales-Brito, E., Paz-Pellat, F., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C., & Velázquez-Rodríguez, A. (2020). Dinámica de carbono en agregados del suelo con diferentes tipos de usos de suelo en el monte Tláloc, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 275-288. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.680>
- Bolaños, G. Y., Bolaños, M. A., Paz P., F., & 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>
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bugno-Pogoda, A., Durak, R., & Durak, T. (2021). Impact of forest management on the temporal dynamics of herbaceous plant diversity in the Carpathian beech forests over 40 years. *Biology*, 10(5), 406. <https://doi.org/10.3390/biology10050406>
- Buurman, P., Amézquita, M. C., & Ramirez, H. F. (2008). Factors affecting soil C stocks: a multivariate analysis approach. En L. Mannelje, M. C. Amézquita, P. Buurman, & M. A. Ibrahim (Eds.), *Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems* (pp. 91-101). Wageningen Academic Publishers.
- Cano-Flores, O., Vela-Correa, G., Acevedo-Sandoval, O. A., & 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>
- Compañía Española de Petróleos [Cepsa] (2015). *El Cambio Climático y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Cepsa*. Cepsa.
- Charan, G., Bharti, V. K., Jadhav, S. E., Kumar, S., Angchok, D., Acharya, S., Kumar, P., & Srivastava, R. B. (2012). Altitudinal variations in soil carbon storage and distribution patterns in cold desert high altitude microclimate of India. *African Journal of Agricultural Research*, 7(47), 6313-6319. <https://doi.org/10.5897/AJAR12.1168>
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Cruz-Cobos, F., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 387-399. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp] (2017). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Cerro Mohinora*. Semarnat - Conanp.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2008). *Fichas técnicas sobre las características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Tomo 1*. Semarnat - Conafor. <http://www.masefi.com.mx/docs/fichas-tecnicas-demaderas.pdf>
- Cuellar, J. C., Ortiz, J. H., & Arciniegas, J. L. (2018). *Modelo para la medición de QoE en IPTV*. Universidad Icesi. <https://doi.org/10.18046/EUI/ec.3.2018>
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Delgadillo, M., & Quechulpa, S. (2006). *Manual de monitoreo de carbono en Sistemas agroforestales*. Conafor - Ambio, S. C. de R. L.
- Dieleman, W. I., Venter, M., Ramachandra, A., Krockenberger, A. K., & Bird, M. I. (2013). Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. *Geoderma*, 204-205, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.005>
- European Environment Agency [EEA] (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*. EEA.



- Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & de los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105-112. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.658>
- Fisher, M. J. (2000). *Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂*. Centro Internacional de Agricultura Tropical - FAO. <https://www.fao.org/3/x4590s/x4590s.pdf>
- Francis, J. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science*, 36(3-4), 346-350.
- Galicia, L., Gamboa C., A. M., Cram, S., Chávez V, B., Peña R, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/articulo/view/73>
- García G., S. A., Alanís, E., Aguirre, O. A., Treviño, E. J., & Graciano, G. (2020). Regeneración y estructura vertical de un bosque de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 92-111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.665>
- Garten, C. F., Post, W. M., Hanson, P. J., & Cooper, L. W. (1999). Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains. *Biogeochemistry*, 45(2), 115-145. <https://doi.org/10.1007/BF01106778>
- Gifford, R. M. (2000). *Carbon contents of above-ground tissues of forest and woodland trees*. Australian Greenhouse Office.
- Girma, A., Soromessa, T., & Bekele, T. (2014). Forest carbon stocks in woody plants of Mount Zequalla Monastery and its variation along altitudinal gradient: Implication of managing forests for climate change mitigation. *Science, Technology and Arts Research Journal*, 3(2), 132-140. <http://dx.doi.org/10.4314/star.v3i2.17>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. J. (2020). Cambios estructurales de la vegetación arbórea en un bosque templado de Durango, México. *Acta Botánica Mexicana*, (127), e1522. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1522>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC] (2018). Resumen para responsables de políticas. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* (pp. 3-24). IPCC.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2018). Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421767. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421767>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2016). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI*. Inegi. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- 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. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- de Jong, B., Anaya, C., Masera, O., Olguín, M., Paz, F., Etchevers, J., Martínez, R. D., Guerrero, G., & Balbontín, C. (2010). Greenhouse gas emissions between 1993 and 2002 from land-use change and forestry in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1689-1701. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.011>
- Kirschbaum, M. U. (2000). Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry*, 48(1), 21-51. <https://doi.org/10.1023/A:1006238902976>
- Lal, R. (2005). Soil erosion and carbon dynamics. *Soil and Tillage Research*, 81(2), 137-142. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.002>
- León, A. R., y A. Aguilar, S. (1987). Materia orgánica. En S. A. Aguilar, J.D. Etchevers-Barra, & J.Z. Castellanos-Ramos (Eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo* (pp. 85-91). Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
- Liu, D., Wang, Z., Zhang, B., Song, K., Li, X., Li, J., Li, F., & Duan, H. (2006). Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast

- China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1-4), 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.09.006>
- Mogollón, J. P., Rivas, W., Martínez, A., Campos, Y., & Márquez, E. (2015). Carbono orgánico del suelo en un gradiente altitudinal en la Península de Paraguaná, Venezuela. *Multiciencias*, 15(3), 271-280.
- Montes de Oca-Cano, E., Rojas-Ascensión, M., García-Ramírez, P., Nájera-Luna, J. A., Méndez-González, J., & Graciano-Luna, J. J. (2012). Estimation of carbon stock in the natural regeneration of *Pinus durangensis* Martínez in El Salto, Durango. *Colombia Forestal*, 15(2), 151-159. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.2.a01>
- Morales E., P. (2021). *Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/31887/1/Informe_sobre_la_brecha_en_las_emisiones_2020.pdf
- Morales-Inocente, M. Á., Najera-Luna, J. A., Escobedo-Bretado, M. Á., Cruz-Cobos, F., Hernández, F. J., & Vargas-Larreta, B. (2020). Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (80), 5-13. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020802997>
- Murga-Orrillo, H., Coronado J., M. F., Abanto-Rodríguez, C., & Lobo, F. A. (2021). Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los bosques tropicales. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732271. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732271>
- Nájera-Luna, J. A., & García-Ramírez, P. (2009). Propiedades físicas de la madera de *Juniperus deppeana* y *Arbustus xalapensis* de la región del Salto Durango. *Agrociencias*, 6(1), 37-41. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.083>
- Navar, H. J. (2016). *Estudio de cuenca de abasto "Guanaceví" Ejido Chiqueros y Anexos, Guanaceví, Durango*. Informe técnico. Universidad Juárez del Estado de Durango e Instituto Tecnológico de El Salto.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2002). *Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis* (NOM-021-RECNAT-2000). Diario Oficial de la Federación. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Ordóñez D., J. A. B., Galicia N., A., Venegas M., N. J., Hernández T., T., Ordóñez D., M. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21(Núm. esp.), 77-216. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. V., Guerrero, G., & Masera, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, México. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2074-2084. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.024>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], & Grupo Técnico Intergubernamental sobre Suelos [ITPS] (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR) - Main Report*. FAO - ITPS. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content>
- Pardos, J. A. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Parras A., L., Lozano G., B., & Galán E., A. (2015). Soil organic carbon along an altitudinal gradient in the Despeñaperros Natural Park, southern Spain. *Solid Earth*, 6(1), 125-134. <https://doi.org/10.5194/se-6-125-2015>
- Pastor, M. J., & Martínez, A. (2009). Variación de la actividad biológica del suelo en un transecto altitudinal de la sierra de San Luis, estado Falcón. *Agronomía Tropical*, 59(4), 469-479.
- de la Paz-Pérez Olvera, C., & Dávalos-Sotelo, R. (2008). Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y Bosques*, 14(3), 43-80. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431206>
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & 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(1), 157-173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., & Tanabe K. (Eds.). (2006). *2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC].
- Quideau, S. A., Chadwick, O. A., Benesi, A., Graham, R. C., & Anderson, M. A. (2001). A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*, 104(1-2), 41-60. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00055-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00055-6)
- Ríos Camey, J. M., Aguirre Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., & de Los Santos-Posadas, H. M. (2021). Crecimiento e incremento en biomasa y carbono de *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede.,



- Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(67), 81-108. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.997>
- Robert, M. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management*. Food And Agriculture Organization of the United Nations.
- Rodríguez-Ortiz, G., de los Santos-Posadas, Héctor M., González-Hernández, V. A., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 18(1), 25-41. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811116>
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I., & Pérez-Hernández, M. J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 8(22), 1-18. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Salazar, A., & Alemán, R. (2002). *Caracterización tecnológica de algunas especies de coníferas de la región de el Salto P.N. Conafor - Inifap*.
- Sanchez, J. E., Harwood, R. R., Willson, T. C., Kizilkaya, K., Smeenk, J., Parker, E., Paul, E. A., Knezek, B. D., & Robertson, G. P. (2004). Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agronomy journal*, 96(3), 769-775. <https://doi.org/10.2134/agronj.2004.0769>
- Schall, P., Gossner, M. M., Heinrichs, S., Fischer, M., Boch, S., Prati, D., Jung, K., Baumgartner, V., Blaser, S., Böhm, S., Buscot, F., Daniel, R., Goldmann, K., Kaiser, K., Kahl, T., Lange, M., Müller, J., Overmann, J., Renner, S. C., & Ammer, C. (2018). The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in European beech forests. *Journal of applied Ecology*, 55(1), 267-278. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12950>
- Schimel, D., Braswell, B., Holland, E., Mckeown, R., Ojima, D. S., Painter, T. H., Parton, W., J., & Townsend, A. R. (1994). Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 8(3), 279-293. <https://doi.org/10.1029/94GB00993>
- Silva-Arredondo, F. M., & Nívar-Cháidez, J. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77-88. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811139>
- Solano P., M. H., Ramon C., P. A., Gusman M., E. C., Burneo V., J. I., Quichimbo M., P. G., & Jiménez A., L. S. (2018). Efecto del gradiente altitudinal sobre las reservas de carbono y nitrógeno del suelo en un matorral seco en Ecuador. *Ecosistemas*, 27(3), 116-122. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1521>
- Soriano-Luna, M. Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438.
- Sotomayor, C. (2008). *Tabla FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas*. Universidad michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Sotomayor, C. (2015). *Banco FITECMA de características físico-mecánicas de maderas mexicanas*. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3497.4884>
- Swift, R. S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166(11), 858-871. <https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00010>
- Tan, Z. X., Lal, R., Smeck, N. E., & Calhoun, F. G. (2004). Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. *Geoderma*, 121(3-4), 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.003>
- Thokchom, A., & Yadava, P. S. (2017). Biomass and carbon stock along an altitudinal gradient in the forest of Manipur, Northeast India. *Tropical Ecology*, 58(2), 389-396.
- Van Breemen, N., & Feijtel, T. C. J. (1990). Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic systems. En A. F. Bouwman (Ed.), *Soils and the greenhouse effect* (pp. 195-223). Wiley.
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Forest biometric system for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vázquez-Cuecuecha, O. G., Zamora-Campos, E. M., García-Gallegos, E., & Ramírez-Flores, J. A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques*, 21(1), 129-138. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211437>
- Wehenkel, C., Flores, J. G. E., Díaz, J. C. H., Pérez, C. Z. Q., Rodríguez, S. L. S., & Maya, E. M. (2022). Variables dasométricas, topográficas y estructura en poblaciones de dos especies del género *Picea*. En M. S. González Elizondo, & C. Wehenkel (Eds.). *Las Piceas (Picea, Pinaceae) de México* (pp. 109-131). Comisión Nacional Forestal.
- Woerner, M. (1989). *Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas*. Departamento Agroforestal, Facultad Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León.

- Yang, Y., Mohammat, A., Feng, J., Zhou, R., & Fang, J. (2007). Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 84(2), 131-141. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9109-z>
- Zanne, A. E., López-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C., & Chave, J. (2009). *Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Global wood density database [Dataset]*. Dryad platform. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>
- Zhang, S., Chen, D., Sun, D., Wang, X., Smith, J. L., & Du, G. (2012). Impacts of altitude and position on the rates of soil nitrogen mineralization and nitrification in alpine meadows on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Biology and Fertility of Soils*, 48(4), 393-400. <https://doi.org/10.1007/s00374-011-0634-5>
- Zhang, X., Cao, Q. V., Xiang, C., Duan, A., & Zhang, J. (2017). Predicting total and component biomass of Chinese fir using a

forecast combination method. *Forest*, 10(4), 687-691. <https://doi.org/10.3832/for2243-010>

Manuscrito recibido el 17 de enero de 2023

Aceptado el 29 de abril de 2024

Publicado el 03 de diciembre de 2024

Este documento se debe citar como:

García-García, S. A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., Cuéllar-Rodríguez, L. G., & Collantes-Chávez Costa, A. (2024). Efecto del gradiente altitudinal y variables climáticas en el almacenamiento de carbono en un bosque templado de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 30(3), e3032574. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032574>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.