

Carbono capturado por los árboles vigorosos en la cuenca “El Carrizal” de Tapalpa, Jalisco

Carbon captured by vigorous trees in the “El Carrizal” watershed of Tapalpa, Jalisco

Recepción del artículo: 14/07/2025 • Aceptación para publicación: 24/08/2025 • Publicación: 01/09/2025

<https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi26.401>

David Arturo Moreno González¹
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1707-4524>

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

*Autor para correspondencia:
moreno.davidarturo@inifap.gob.mx

Resumen

La vegetación de los bosques y selvas se considera un sumidero significativo para los gases de efecto invernadero porque ostenta la capacidad de tomar el CO₂ del aire, liberar el oxígeno y fijar el carbono en forma de materia orgánica en su biomasa. Sin embargo, se desconoce el contenido de carbono en los árboles de acuerdo a su tamaño. El objetivo fue estimar el carbono capturado en la biomasa aérea de los árboles vigorosos en función de su grandeza y densidad arbórea. El estudio se realizó mediante el método no destructivo con el cálculo del volumen, multiplicado por el peso específico de la madera y la proporción del contenido de carbono, para obtener una ecuación predictiva mediante análisis de regresión lineal simple. El carbono capturado por árbol vigoroso varió de 85 a 1030 Kg, con promedios de 146, 294, 601 y 872 Kg en las etapas de bajo latizal, alto latizal, fustal joven y fustal maduro, respectivamente. Por unidad de superficie se predijo una captura de 10 a 279 Mg C ha⁻¹. La determinación adecuada de biomasa en los árboles vigorosos, permitió calcular los montos de carbono por árbol y unidad de superficie en cada etapa de desarrollo del bosque.

Palabras clave: Biomasa aérea, bosque de pino, etapas de desarrollo, pino vigoroso, secuestro de carbono, volumen maderable.

Abstract

Forest and jungle vegetation is considered a significant sink for greenhouse gases because it has the ability to absorb CO₂ from the air, release oxygen, and sequester carbon in the form of organic matter in its biomass. However, the carbon content of trees based on their size is unknown. The objective was to estimate the carbon sequestered in the aboveground biomass of vigorous trees based on their size and tree density. The study was conducted using a nondestructive method, calculating the volume multiplied by the specific weight of the wood and the proportion of carbon content, to obtain a predictive equation using simple linear regression analysis. Carbon sequestered per vigorous tree ranged from 85 to 1030 kg, with averages of 146, 294, 601, and 872 kg at the low-stem, high-stem, young stem, and mature stem stages, respectively. Per unit area, a sequestration of 10 to 279 Mg C ha⁻¹ was predicted. The accurate determination of biomass in vigorous trees allowed for the calculation of carbon amounts per tree and unit area at each stage of forest development.

Keywords: Aboveground biomass, pine forest, developmental stages, vigorous pine, carbon sequestration, timber volume.

Introducción

Los árboles de los bosques son indispensables para capturar y acumular el carbono en su biomasa, contribuyendo a reducir las concentraciones del CO₂ atmosférico y a mitigar el impacto del cambio climático (Ordoñez, 2008; Pimienta *et al.*, 2019; Hernández *et al.*, 2020; García *et al.*, 2021). Por tal motivo, el bosque actúa como un sumidero de carbono, almacenando el 44% en su biomasa, 45% en el suelo y 11% en la madera muerta y hojarasca (FAO, 2010). El carbono almacenado en la biomasa aérea de los bosques de coníferas en México tiene un promedio de 30 Mg C ha⁻¹, con un límite inferior de 29.01 y un límite superior de 30.98, calculados en 2659 unidades de muestreo primarias (CONAFOR, 2018). En este sentido, se han realizado trabajos de investigación en diferentes regiones del país, donde se reportan cantidades superiores a la media nacional, por ejemplo: los rodales naturales con *Pinus oocarpa* Schl. et Cham. en tres localidades de Chiapas, capturaron en promedio 52.70 Mg C ha⁻¹, con una variación de 20.32 a 99.07 Mg C ha⁻¹ (Gutiérrez y Flores, 2018). En Durango, a un bosque templado – frío con mezcla de especies se le estimaron 65 Mg C ha⁻¹ (Graciano *et al.*, 2019). En otros bosques mixtos con presencia de *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Tlaxco, Tlaxcala, la concentración de carbono en la biomasa aérea del extracto arbóreo varió de 45.6 a 90.4 Mg C ha⁻¹ (Acosta *et al.*, 2009). En la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, el contenido de carbono en la parte aérea del bosque de pino – encino se estimó en 82.9 Mg C ha⁻¹ (Rodríguez *et al.*, 2009). La discrepancia en los valores expresados se explica por la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar el carbono en su tronco, ramas y follaje, la cual varía en función de la composición de especies, la edad del arbolado y la densidad de población (Rodríguez *et al.*, 2009). No obstante, se desconoce la cantidad de carbono atrapado en la biomasa viva de cada árbol, de acuerdo a sus dimensiones. Por tal motivo, se indaga el contenido de carbono en árboles vigorosos con el objetivo de conocer la cantidad capturada en función de su tamaño y densidad arbórea, teniendo como ejemplo la masa forestal de la cuenca hidrológica “El Carrizal” en la Sierra de Tapalpa, Jalisco. Los resultados permitirán conocer la cantidad de carbono almacenado por los árboles en las diferentes etapas del desarrollo, con la finalidad de dirigir las prácticas silvícolas que procuren optimizar la mitigación del cambio climático.

Materiales y Métodos

Área de estudio

“El Carrizal” es una pequeña cuenca hidrológica de la Sierra de Tapalpa, la cual se ubica en la parte centro occidental del

Eje Neovolcánico Transversal, a una distancia aproximada de 137 km al Sur de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco (Figura 1). Este lugar se constituye por un sistema montañoso con elevaciones desde 2 020 hasta 2 420 msnm, situado entre las unidades UTM (Universal Transversal de Mercator) de 2 204 500 a 2 209 000 y 622 000 a 625 750. El clima es templado subhúmedo (García, 1988) con lluvias en verano e invierno. Los suelos de tipo regosol se originaron de roca volcánica y presentan un grosor diferente que influye en la calidad de sitio (Gómez-Tagle y Chávez, 1986; Baker *et al.*, 1995). La cuenca “El Carrizal” tiene una masa arbolada de 912 hectáreas, cubriendo terrenos con inclinación del 5 al 65 % y amplia variación en la exposición geográfica, donde predominan las especies de *Pinus devoniana* Lindley, *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. leiophylla* Schl. & Cham. y *P. pseudostrobus* Lindley. El aprovechamiento forestal se realiza mediante el Sistema de Manejo Integrado de los Recursos Forestales (SIMANIN) (Manzanilla *et al.*, 1997) y, a la fecha de la toma de datos en campo, la mayoría de la estructura arbórea estaba desplegada como rodales coetáneos en diferentes etapas de desarrollo (Moreno, 2022).



Figura 1. Ubicación de El Carrizal en la cuenca alta de Tapalpa, Jalisco. Fuente: Modificación propia, realizada en Flores *et al.*, (2005).

Recolección y procesamiento de los datos

La información proviene de un muestreo sistemático realizado en el 2003, once años después de haberse puesto en marcha el SIMANIN. Este diseño arrojó 71 sitios circulares, 25 en áreas de regeneración mediante árboles padres y 46 en masas de arbolado todavía sin intervención silvícola. A través de una depuración de datos y el promedio de diámetro normal y altura total se seleccionaron 64 árboles: 17 progenitores y 47 de las áreas no intervenidas. Estos árboles se clasificaron por las categorías diamétricas expuestas en el cuadro 1 (Moreno, 2024).

Cuadro 1. Clasificación diamétrica del desarrollo forestal.

Etapas de desarrollo	Clase diamétrica (cm)
Regeneración y brinzal	< 7.6
Monte bravo	7.6–12.5
Vardazcal	12.6–17.5
Bajo latizal	17.6–27.5
Alto latizal	27.6–37.5
Fustal joven	37.6–47.5
Fustal maduro	> 47.5

Para estimar el carbono capturado por árbol vigoroso de cada etapa de desarrollo se utilizó el método indirecto no destructivo, el cual considera las dimensiones del árbol en pie, como son diámetro normal y altura. Primero se calculó el volumen de la parte aérea a partir del área basal, altura total del árbol, el coeficiente mórfico y un factor de expansión para agregar la enramada, mediante la fórmula siguiente (Pimienta *et al.*, 2019; Paz *et al.*, 2021):

$$Va = \pi/4 * d^2 * h * Cm * Fex \quad (1)$$

donde:

Va = Volumen de la parte aérea del árbol (m^3)

$\pi/4 = 3.1416/4 = 0.7854$

d = Diámetro normal del árbol, medido a 1.3 m de la altura del fuste (m)

h = Altura total del árbol (m)

Cm = Coeficiente mórfico (0.6)

Fex = Factor de expansión del volumen (1.35)

Enseguida, el volumen obtenido de la parte aérea de cada árbol se multiplicó por 430, 450, 470 y 540 (Kg/m^3), como valores de la densidad específica de la madera de los árboles de *Pinus leiophylla*, *P. devoniana*, *P. oocarpa* y *P. pseudostrobus*, respectivamente (Sotomayor, 2015), con la finalidad de estimar la biomasa aérea (Paz *et al.*, 2021) que, a su vez, se multiplicó por el valor de 0.50 (IPCC, 2006) para obtener la concentración promedio de carbono capturado por árbol (Rodríguez *et al.*, 2016; Gutiérrez y Flores, 2018; Pimienta *et al.*, 2019; Graciano *et al.*, 2019; Guzmán *et al.*, 2024) en cada una de las etapas de desarrollo:

$$C = Va * D * P \quad (2)$$

donde:

C = Carbono capturado por árbol vigoroso (Kg)

Va = Volumen de la parte aérea (m^3)

D = Densidad de la madera (Kg/m^3)

P = Proporción de carbono capturado por especies de coníferas (0.50)

Después se generó una ecuación mediante análisis de regresión lineal simple para predecir el carbono almacenado sin derribar el árbol, considerando el diámetro normal (variable independiente) y los datos obtenidos de carbono capturado por árbol (variable dependiente), como variables aleatorias que permiten una relación lineal entre ellas (Romahn y Ramírez, 2010):

$$Y = a + bx \quad (3)$$

donde:

Y = Predicción de carbono capturado por árbol vigoroso (variable dependiente)

a = Valor de la ordenada en el origen del eje “Y” cuando vale cero

b = Pendiente de la recta de regresión

x = Diámetro normal del árbol vigoroso (variable independiente)

Para generar ésta ecuación se utilizó el método de mínimos cuadrados con las fórmulas respectivas, como son: la pendiente de la recta de regresión que indica el cambio en el contenido de carbono al ampliar el diámetro (4); la ordenada en el origen del eje “Y” o cantidad estimada de carbono cuando el diámetro toma el valor de cero (5); el error estándar de la estimación que influye en la respuesta de la regresión en pequeña magnitud (6); el coeficiente de correlación de Pearson que indica una relación directa entre el aumento en el carbono almacenado al aumentar el diámetro (7); y, el coeficiente de determinación que explica la proporción en la variación de carbono capturado debida al diámetro normal del arbolado (8):

Pendiente de la recta de regresión:

$$b = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad (4)$$

Ordenada al eje “Y” o intercepto de la recta:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (5)$$

Error estándar de la estimación o desviación estándar (S_{xy}) de la regresión que mide el error de carbono capturado por árbol (y) hasta la recta de regresión:

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a\sum y - b\sum xy}{n - 2}} \quad (6)$$

Coeficiente de correlación de Pearson (r) que expresa el grado o fuerza de la relación lineal:

$$r = \frac{n\sum xy - \sum x\sum y}{\sqrt{(n\sum x^2 - (\sum x)^2)(n\sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad (7)$$

Coeficiente de determinación (r^2) como el porcentaje de variación en el carbono capturado por árbol (y) que explica la ecuación de regresión. Lo que señala que tan exactas son las predicciones de la ecuación generada, representando la proporción en que se reduce el error:

$$r^2 \quad (8)$$

Finalmente se realizó el cálculo de carbono capturado por unidad de superficie en cada una de las etapas de desarrollo de los árboles vigorosos, considerando los rangos de densidad arbórea presentados por Moreno (2024).

Resultados y Discusión

Las dimensiones en diámetro y altura de los 64 árboles vigorosos de la cuenca “El Carrizal” tuvieron una variación de 20 a 76 cm y 12 a 31 m, respectivamente, las cuales corresponden a las etapas de bajo latizal (14%), alto latizal (33%), fustal joven (17%), fustal maduro (9%) y progenitores (26%) de las áreas intervenidas con la corta de regeneración mediante árboles padres (Cuadro 2).

Cuadro 2. Dimensión en diámetro y altura de los árboles vigorosos por etapa de desarrollo.

Etapa de desarrollo	Cantidad (n)	Proporción (%)	Diámetro (cm)			Altura (m)		
			Min.	Medio	Max.	Min.	Medio	Max.
Bajo latizal	9	14	20	25	27	13	16	23
Alto latizal	21	33	28	32	37	12	19	25
Fustal joven	11	17	37	41	46	17	24	30
Fustal maduro	6	9	47	50	52	12	24	29
Progenitores	17	26	44	54	76	21	26	31
n = 64		100						

Volumen de la parte aérea por árbol en cada etapa de desarrollo

El volumen calculado de los árboles vigorosos varió de 0.38 a 4.38 m³, como valores mínimo y máximo de las etapas de bajo latizal y fustal maduro, respectivamente. Aunque, el árbol progenitor de mayor tamaño culminó con 10.6 m³, poco más del doble (Cuadro 3). Puede observarse que los árboles vigorosos duplican su volumen en las etapas de desarrollo más jóvenes de bajo a alto latizal y hasta fustal joven, disminuyendo en la etapa de fustal maduro.

Cuadro 3. Volumen calculado de los árboles vigorosos por etapa de desarrollo.

Etapa de desarrollo	Volumen (m ³)		
	Mínimo	Medio	Máximo
Bajo latizal	0.38	0.64	1.05
Alto latizal	0.75	1.30	2.04
Fustal joven	1.80	2.64	3.63
Fustal maduro	2.19	3.85	4.38
Progenitores	2.77	5.04	10.6

Biomasa aérea y carbono capturado por árbol en cada etapa de desarrollo

Los valores en biomasa aérea y carbono capturado se calcularon por árbol vigoroso en cada etapa de desarrollo (Cuadro 4). La biomasa aérea acumulada se estimó en 169 Kg para el árbol más pequeño de *Pinus devoniana* con diámetro de 20 cm en la etapa de bajo latizal, lo que representa 85 Kg de carbono capturado. Por el contrario, la mayor cantidad de biomasa aérea acumulada se estimó en 4783 Kg para el árbol progenitor más grande de la misma especie con 76 cm de diámetro, lo que significa una captura de 2391 Kg de carbono. Puede observarse que los valores mínimos, medios y máximos tanto de biomasa como de carbono, al igual que el volumen, casi se duplican de la etapa de bajo a alto latizal y de ésta a fustal joven. Aunque éstos incrementos se acumulan en menor proporción en la etapa de fustal maduro, se acepta que la tasa de fijación de carbono es más alta en rodales jóvenes, pero la acumulación total de carbono es mayor en los maduros (Razo *et al.*, 2013).

Cuadro 4. Biomasa aérea y carbono capturado por árbol vigoroso y etapa de desarrollo.

Etapa de desarrollo	Biomasa aérea (Kg)			Carbono (Kg)		
	Mínima	Media	Máxima	Mínimo	Medio	Máximo
Bajo latizal	169	291	473	85	146	237
Alto latizal	322	589	878	161	294	439
Fustal joven	810	1202	1634	405	601	817
Fustal maduro	986	1744	2060	493	872	1030
Progenitores	1247	2274	4783	624	1137	2391

Para éstas mismas etapas de desarrollo, Figueroa *et al.* (2010) y Soriano *et al.* (2015) presentaron cantidades tocantes en biomasa total por árbol de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo, abarcando rangos de 102 a 4074 Kg con diámetros de 17.8 a 73.0 cm. Aunque en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, el *Pinus patula* en la etapa de vardazcal con 1500 árboles ha⁻¹ presentó en promedio 5.56 Kg por árbol (Rodríguez *et al.*, 2019). Del mismo modo, Navarro *et al.* (2020) estimaron la biomasa aérea en 37 a 5856 Kg por árbol de *Pinus oocarpa* del Estado de Guerrero mediante un muestreo directo destructivo, abarcando diámetros de 12.5 a 82.0 cm. Mientras que en 40 árboles de *Pinus halepensis*, con diámetro basal de 25 a 75 cm, varió de 102 a 1352 Kg (Montoya *et al.*, 2018). Y, a los árboles de *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Ixta – Popo, con diámetro normal de 3.3 a 57.2 cm, se les estimó de 1.37 a 1142 Kg por árbol (Carrillo *et al.*, 2016). Por su parte, el *Pinus cembroides* Zucc con diámetro de 5 a 40 cm, varió de 2.8 a 700 Kg (Cuevas y Aquino, 2020). Estas discrepancias en acumulación de biomasa están influenciadas por factores como son: desarrollo del rodal, edad, calidad del sitio, composición de especies, variables ambientales, densidad del rodal y prácticas silvícolas (Chávez *et al.*, 2016). Por tal motivo, Marroquín *et al.* (2018) señalan la necesidad de elaborar la ecuación apropiada para estimar la biomasa a cada especie y región.

Ecuación generada para predecir el carbono capturado por árbol

Se obtuvieron los valores de la ecuación (3) mediante análisis de regresión lineal simple para predecir el carbono capturado por árbol vigoroso, considerando el diámetro normal (variable independiente) y los datos obtenidos de carbono capturado por árbol (variable dependiente), el resultado es el siguiente:

$$Y = -916 + (37.72)(x)$$

donde:

Y = Predicción de carbono capturado por árbol vigoroso

a = Cantidad estimada de carbono cuando el diámetro toma el valor de cero (-916)

b = Pendiente de la recta de regresión (37.72)

x = Diámetro normal del árbol vigoroso para la demostración

Para valorar la relación entre el diámetro normal y el carbono capturado fica denominada diagrama de dispersión de puntos

(Figura 2), donde se visualiza la posición de la línea recta que representa la relación general de los puntos. Aunque no todos los puntos estén en la recta, ésta hace mínima la suma de las diferencias cuadráticas entre el carbono capturado y el diámetro. El distanciamiento de los puntos con la recta es lo que representa el error estándar de la estimación, en este estudio fue de 146.45. Entre más pequeño es el error, las inferencias tienen más validez, cuando $0.7 \leq r \leq 1$ existe un alto grado de asociación entre las variables. En este sentido, el coeficiente de correlación de Pearson (r) obtuvo un valor de 0.95. Por lo tanto, el coeficiente de determinación (r^2) es del 90 %, el cual indica que la variación en carbono capturado por árbol vigoroso debido al diámetro normal del arbolado se explica mediante la ecuación de la regresión obtenida, es decir, para mayores valores de diámetro, mayores valores de carbono capturado.

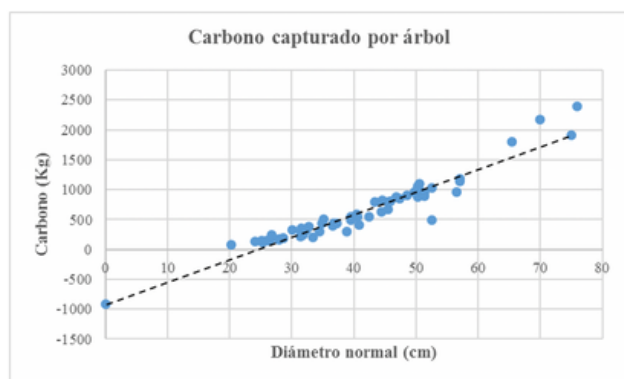


Figura 2. Diagrama de dispersión de puntos y recta de la regresión que representan el carbono capturado por árbol vigoroso de acuerdo al diámetro normal.

Por lo anterior, en la cuenca “El Carrizal” de Tapalpa, Jalisco, un árbol vigoroso de *Pinus devoniana* en la etapa de bajo latizal, con diámetro normal de 25 cm capturó 27 Kg C,

Cuadro 5. Predicción de carbono capturado por árbol vigoroso en cada etapa de desarrollo a partir de la ecuación obtenida para la cuenca “El Carrizal”.

Etapas de desarrollo	Diámetro normal (cm)	Carbono capturado (Kg)
Bajo latizal	25.0	27
	27.5	121
Alto latizal	27.6	125
	30.0	215
	35.0	404
	37.5	498
Fustal joven	37.6	502
	40.0	593
	45.0	781
	47.5	875
Fustal maduro	47.6	879
	50.0	970
	55.0	1158
	57.5	1253
Progenitores	60.0	1347
	65.0	1536
	67.5	1630
	70.0	1724
	75.0	1913

lo que representa una tasa anual de 1 Kg C, considerando que ésta especie tiene el incremento corriente anual (ICA) en diámetro de un centímetro (Manzanilla *et al*, 1997). La misma especie en la etapa de fustal maduro y el doble de diámetro capturó 970 con 19 Kg C año⁻¹. Y, con el triple de diámetro, como árbol padre, capturó 1913 con 25 Kg C año⁻¹ (Cuadro 5). En este sentido, mediante la ecuación obtenida, la captura de 100 Kg C árbol⁻¹ se alcanza con un diámetro normal de 27 cm y una tasa promedio de 4 Kg C año⁻¹ en la etapa de bajo latizal. La captura de 250 Kg C árbol⁻¹ se consigue con 31 cm de diámetro y una tasa promedio de 8 Kg C año⁻¹ en la etapa de alto latizal. La captura de 500 Kg C árbol⁻¹ se logra con 37.6 cm de diámetro y una tasa promedio de 13 Kg C año⁻¹ en la etapa de fustal joven. Por último, la captura de una tonelada (1000 Kg C árbol⁻¹) se adquiere con un diámetro de 51 cm y una tasa promedio de 20 Kg C año⁻¹ en la etapa de fustal maduro.

Carbono capturado por superficie en cada etapa de desarrollo

Se consideraron los sitios que estuvieran dentro del rango de densidad arbórea para cada etapa de desarrollo (Moreno, 2024). Luego el número de árboles por unidad de superficie se multiplicó por la correspondiente cantidad de carbono capturada por el árbol de ese sitio y se dividió entre 1000 para obtener el resultado en megatoneladas. El promedio obtenido fue de 58, 89, 126 y 168 Mg C ha⁻¹ para las etapas de bajo latizal, alto latizal, fustal joven y fustal maduro, respectivamente, con una variación de 10 a 279 Mg C ha⁻¹ (Cuadro 6), a la que corresponde una tasa anual aproximada de 0.5 a 5.5 Mg C ha⁻¹. Estas cantidades estimadas para la cuenca “El Carrizal” superan el promedio de 30 Mg C ha⁻¹ (29.01 a 30.98 Mg C ha⁻¹) mencionado por la CONAFOR (2018) a partir de los resultados del Inventario Nacional Forestal y de suelos para los bosques de coníferas.

Cuadro 6. Rangos de densidad arbórea, carbono capturado por árbol vigoroso y por unidad de superficie en cada etapa de desarrollo.

Etapas de desarrollo	Densidad arbórea (Árboles ha ⁻¹)	Kg C árbol ⁻¹	Mg C ha ⁻¹		
			Mínimo	Medio	Máximo
Bajo latizal	66 a 650	85 a 237	10	58	154
Alto latizal	150 a 583	161 a 439	30	89	207
Fustal joven	66 a 450	405 a 817	34	126	247
Fustal maduro	133 a 283	493 a 1030	65	168	279

Resultados relativos se obtuvieron por investigadores con otras especies en diferentes regiones del país. Entre ellas se menciona la Sierra Alta de Hidalgo, donde Ronquillo *et al.* (2022) estimaron el almacenamiento de carbono aéreo en Mg C ha⁻¹ de las etapas de *Pinus patula*: brinzal (0.94), monte bravo (3.73), vardazcal (5.05), latizal (18.18) y fustal (81.40). En la misma región y especie, con 80 años y sin manejo silvícola, el promedio fue de 104 Mg C ha⁻¹ (Chávez *et al.*, 2016). Mientras en El Salto, Durango, el arbolado joven (18 cm de diámetro y 12 m de altura media) resultó con 66 Mg C ha⁻¹ (Morales *et al.*, 2020). En otro bosque de Durango, con diámetro y altura más amplios, el efecto

fue similar con 65 Mg C ha^{-1} (Graciano *et al.*, 2019). En tres localidades de Chiapas, los rodales naturales de *Pinus oocarpa*, con diferente densidad arbórea, capturaron en promedio $52.70 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (20.32, 38.69 y 99.07) (Gutiérrez y Flores, 2018). En la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, un rodal sin manejo forestal presentó 155 Mg C ha^{-1} y con manejo mediante el método de selección 128 Mg C ha^{-1} , el cual recuperó el volumen extraído en los siguientes 10 años (Hernández *et al.*, 2020). En Tlaxco, Tlaxcala, el contenido de carbono en la parte aérea del estrato arbóreo de los bosques mixtos de *Pinus patula* varió de 45.6 a $90.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Acosta *et al.*, 2009). De igual forma, en el sur de Nuevo León las estimaciones del contenido de carbono para diferentes bosques fueron: *Pinus pseudostrobus* $73.18 \text{ Mg C ha}^{-1}$, *Pinus teocote* $47.01 \text{ Mg C ha}^{-1}$, encino – pino $64.20 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y pino – encino $45.24 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Aguirre y Jiménez, 2011). Mientras en la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, Tamaulipas, al bosque tropical subcaducifolio se le estimaron $68.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ de fustes, ramas y hojas (Rodríguez *et al.*, 2008). En general, Casiano *et al.* (2018) recopilaron información relacionada con la estimación de carbono en la biomasa aérea para los bosques templados de coníferas y latifoliadas, los cuales presentaron una variación de 19.30 a $98.84 \text{ Mg C ha}^{-1}$ hasta los 95 años de edad, con una tasa anual de 1.5 a 4.5 Mg C ha^{-1} en función de las condiciones climáticas.

Conclusiones

Los pinos jóvenes de la cuenca “El Carrizal” se desarrollaron más rápido que los maduros, duplicando su volumen, biomasa y carbono capturado de las etapas de bajo a alto latizal, y de ésta a fustal joven. Sin embargo, las tasas máximas de captura ocurrieron cuando los árboles vigorosos se encontraban en la etapa de fustal maduro con 20 Mg C año^{-1} . Lo que significa que la fijación de carbono se acumula hasta 5 veces en comparación con la etapa joven de bajo latizal. Consecuentemente, se tiene la posibilidad de aumentar la productividad y, por lo tanto, la captura de carbono, manteniendo el vigor de los árboles al liberarlos de la competencia natural por el espacio mediante la aplicación de prácticas silvícolas de aclareo.

Agradecimientos

A los dirigentes de Industrias Forestales de Tapalpa, productores forestales de la región y trabajadores de la empresa, por las facilidades otorgadas para la toma de datos en campo.

Literatura citada

- Acosta M., M., Carrillo A., F., y Díaz L., M. (2009). Determinación de carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n2a3.pdf>
- Aguirre C., O. A. y Jiménez P., 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>
- Baker, M. B. Jr., Chávez H., Y., Medina, A. L. y Dudley, S. (1995). "Aplicación de sistemas de información geográfica en la evaluación de la cuenca del arroyo El Carrizal, Tapalpa, Jalisco, México". En: Aguirre B., C., L. Eskew, C. E. González V. y A. B. Villa S. (Editores/compiladores técnicos). *Cooperación Social para el Manejo Sostenible de los Ecosistemas Forestales*. (Quinto Simposium Biental México-Estados Unidos de América, celebrado del 27 al 30 de octubre de 1994 en Guadalajara, Jalisco. México). Servicio Forestal, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- Carrillo A., F., Acosta M., M., Jiménez C., C. del R., González M., L. y Etchevers B., J. D. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea del *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta – Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 681-691. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.327>
- Casiano D., M., Paz P., F., Rojo M., M., Covalleda O., S. y Raj A., D. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(Número especial), e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- CONAFOR. (2018). Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de resultados 2009 – 2014. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco. México. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf>
- Cuevas C., J. C. y Aquino R., M. (2020). Ecuaciones de aditividad para la estimación de biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611821. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611821>
- Chávez A., G., Ángeles P., G., Pérez S., M., López L., M. A., García M., E. y Wayson, C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22(3), 23-36. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231454>
- FAO. (2010). Evaluación de los recursos forestales mundiales. Roma, Italia. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>
- Figueroa N., C. M., Ángeles P., G., Velázquez M., A. y de los Santos P., 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>
- Flores G., J. G., Benavides S., J. de D. y Moreno G., D. A. (2005). Clasificación espectral de coberturas de suelo como soporte en la evaluación del potencial de servicios ambientales. En Benavides S., J. de D., F. Becerra L., T. Hernández T., C. González S. y J. G. Flores G. (Editores). *Contribución al estudio de los servicios ambientales*. Libro Técnico Núm. 1. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. SAGARPA. Guadalajara, Jalisco. México. 246 p. ISBN: 968-800-662-9
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climático de Köppen*. Ed. Larios, S.A. México, Distrito Federal.
- García G., S. A., Alanís R., E., Aguirre C., O. A., Treviño G., E. J. y Graciano A., G. (2021). Contenido de carbono y estructura horizontal de un bosque templado en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63), 48-70. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.800>
- Gómez-Tagle R., A. y Chávez H., Y. (1986). Aplicación de los criterios de agrología forestal al estudio de los suelos de bosque en la zona oeste de Tapalpa, Jalisco. *Revista Ciencia Forestal en México* 11(59), 65-89. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/articulo/view/1209/2680>
- Graciano A., G., Alanís R., E., Aguirre C., O. A., González T., M. A., Treviño G., E. J., Mora O., A. y Buendía R., E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado – frío de Durango, México. *Rev. Fitotec. Mex.*, 42(2), 119-127. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119>
- Gutiérrez V., B. N. y Flores M., A. (2018). Captura de carbono y modelos alométricos para estimar biomasa en rodales naturales de *Pinus oocarpa* Schl. et Cham., en Chiapas, México. *Foresta Veracruzana*, 20(2), 21-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49758340005>
- Guzmán S., J. C., De los Santos P., H. M., Vargas L., B., Gómez C., M. y Marroquín M., P. (2024). Estimación de biomasa y carbono aéreo en bosques templados del sur de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(2), e3934. <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.3934>
- Hernández M., J. A., Velázquez M., A., Fierros G., A. M., Gómez G., A., Reyes H., V. J., y Gil V. C., J. A. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611802. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611802>
- IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 4: Forest Land. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Marroquín M., P., Méndez G., J., Jiménez P., J., Aguirre C., O. A. y Yerena Y., J. I. (2018). Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 94-110. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.172>

- Manzanilla, H., Vázquez G., L., Moreno G., D. A., Talavera Z., E., Espinoza A., J., Flores G., J. G., Rueda S., A., Benavides S., J. de D., Villa C., J., Martínez D., M., Eguarte V., J. A., Chávez H., Y., Orduña T., C., Sáenz R., J. T., Madrigal H., L. y Gómez Tagle R., A. (1997). *Sistema de Manejo Integrado de los Recursos Forestales (SIMANIN)*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Guadalajara, Jalisco. México.
- Montoya J., J. C., Méndez G., J., Sosa D., L., Ruiz G., C. G., Zermeño G., A., Nájera L., J. A., Manzano C., M. G. y Velázquez R., A. S. (2018). Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México. *Madera y Bosques*, 24(Número especial). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401880>
- Morales I., M. A., Nájera L., J. A., Escobedo B., M. A., Cruz C., F., Hernández, F. J. y Vargas L., B. (2020). Carbono retenido en biomasa y suelo en bosques de El Salto, Durango, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 28(80), 5-13. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020802997>
- Moreno G., D. A. (2022). Dispersión espacial del arbolado en una cuenca forestal de Tapalpa, Jalisco. *e-CUCBA* 9(18), 47-56. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi18.240>.
- Moreno G., D. A. (2024). Densidad arbórea por etapa de desarrollo en la cuenca “El Carrizal” de Tapalpa, Jalisco. *e-CUCBA* 11(23), 50-58. <https://doi.org/10.32870/e-ecucba.vi23.357>.
- Navarro M., J., Godínez J., F., López L., M. A., Rosas A., J. L., Juárez L., A. L. y Reyes U., M. (2020). Ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa* y *Quercus resinosa* en Guerrero, México. *Madera y Bosques*, 26(1), <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611964>
- Ordoñez D., J. A. B. (2008). Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*, 90, 37-42. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=64411395006>
- Paz P., F., Velázquez R., A., Sánchez S., C., Salas A., V., Méndez G., J., Acosta M., M. y Nájera L., J. A. (2021). Alometría generalizada para la estimación de la biomasa aérea total de plantas leñosas: marco teórico general y aplicaciones. *Madera y Bosques*, 27(4). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742442>
- Pimienta de la T., D. de J., Reyes R., J., Rodríguez M., J. A. y Marroquín M., P. (2019). Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 23(2), 31-41. <https://www.researchgate.net/publication/357751490>
- Razo Z., R., Gordillo M., A. J., Rodríguez L., R., Maycotte M., C. C. y Acevedo S., O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 73-86. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61728317006>
- Rodríguez L., R., Jiménez P., J., Meza R., J., Aguirre C., O. A. y Razo Z., R. (2008). Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 215-222. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icap/LI_IntGenAmb/Joel_Meza/9.pdf
- Rodríguez L., R., Jiménez P., J., Aguirre C., O. A., Treviño G., E. J. y Razo Z., R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino – encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Revista Ra Ximhai*, 5(3), 317-327. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46111817006>
- Rodríguez L., L. A., Guevara H., F., Reyes M., L., Ovando C., J., Nahed T., J., Prado L., M. y Campos S., R. A. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77-94. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53>
- Rodríguez O., G., García A., J. A., Leyva L., J. C., Ruiz D., C., Enríquez del V., J. R. y Santiago G., W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Romahn de la V., C. F. y Ramírez M., H. (2010). *Dendrometría*. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. México. <https://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometría>.
- Ronquillo G., N., Razo Z., R., Rodríguez L., R., Acevedo S., O. A., Hernández O., J. y Manzur Ch., N. (2022). Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en la Sierra Alta Hidalguense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 483-497. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009>
- Soriano L., M. de los A., Ángeles P., G., Martínez T., T., Plascencia E., F. O. y Razo Z., R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438. ISSN: 1405-3195. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239403006>
- Sotomayor C., J. R. (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. Morelia, Michoacán, México. 65 p. ISBN: 978-607-00-9036-3. http://www.fitecma.umich.mx/files/8314/4535/8020/Libro_Banco_FITECMA_2015.pdf