



DOI: [10.29298/rmcf.v16i87.1503](https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1503)

Artículo de investigación

Biomasa aérea y radicular en etapa de brinzal de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. en Hidalgo
Aboveground and root biomass in sapling stage of *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. in Hidalgo state

Nancy Manzur Chávez¹, Rodrigo Rodríguez Laguna^{2*}, Ramón Razo Zárate², Otilio Arturo Acevedo Sandoval¹, Pablo Octavio Aguilar¹

Fecha de recepción/Reception date: 16 de julio de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 22 de octubre de 2024.

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. México.

²Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: rlaguna@uaeh.edu.mx

*Corresponding author; e-mail: rlaguna@uaeh.edu.mx

Resumen

El desarrollo inicial del bosque es conocido como brinzal. Etapa en la cual, la densidad de regeneración es alta; por lo que la velocidad de acumulación de biomasa es mayor. En este contexto se planteó el objetivo de estimar la capacidad de almacenamiento de biomasa total (aérea-raíz) en árboles en etapa inicial de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Se establecieron cuatro sitios de muestreo de 100 m² para obtener densidad de población. Se extrajeron con raíz 52 ejemplares menores a 1.5 m de altura y 5 cm de diámetro basal promedio; se utilizó un rociador de mochila de agua a presión con el cual se desprendió el suelo de la raíz; posteriormente, el material vegetal se depositó en una estufa de secado a 80 °C hasta alcanzar peso constante. Los resultados indicaron que los árboles de oyamel en etapa de brinzal formaron el grupo básico (altura de 6 a 65 cm) con 72.6 % de biomasa aérea y 27.4 % de biomasa radicular; otro grupo desarrollado (altura de 68 a 150 cm), con 75.8 y 24.2 % de biomasa aérea y radicular, respectivamente. La biomasa almacenada en el bosque de oyamel en etapa de brinzal fue de 103.6 kg ha⁻¹, con potencial de acumulación de biomasa aérea-raíz en relación 3:1 en claros del dosel, que favorecieron el establecimiento de la regeneración natural. La relación de biomasa radicular, respecto a la biomasa aérea en etapa de brinzal cambia con la edad en los árboles de *Abies religiosa*.

Palabras clave: Área Natural Protegida, biomasa aérea, biomasa radicular, brinzal, oyamel, regeneración natural.

Abstract

The initial development of the forest is known as sapling. At this stage the regeneration density is high, so the biomass accumulation rate is higher. In this context, the objective of estimating the total biomass storage capacity (aboveground-root) in trees in the initial stage of *Abies religiosa* in *El Chico* National Park, *Hidalgo* state, was raised. Four sampling sites of 100 m² were established to obtain population density. 52 specimens

less than 1.5 m in height and 5 cm in average base diameter were extracted with roots; a high-pressure water backpack sprayer was used to detach the soil from the root; later the plant material was placed in a drying oven at 80 °C until reaching constant weight. Results indicate that the fir trees in the sapling stage formed the basic group (height 6 to 65 cm) with 72.6 % of aboveground biomass and 27.4 % of root biomass, and another developed group (height 68 to 150 cm), with 75.8 and 24.2 % of aboveground and root biomass, respectively. The biomass stored in the fir forest in the sapling stage was 103.6 kg ha⁻¹, with potential accumulation of aboveground/root biomass in a 3:1 ratio in canopy gaps, which favored the establishment of natural regeneration. The ratio of root biomass to aboveground biomass in the sapling stage changes with age in *Abies religiosa* trees.

Key words: Natural Protected Area, aboveground biomass, root biomass, sapling, fir, natural regeneration.

Introducción

La biomasa vegetal se forma con todos los componentes orgánicos dentro de un ecosistema (Litton et al., 2007) y es importante como fuente de energía, así como en el almacenamiento de Carbono (C) y Nitrógeno (N) (Peichl et al., 2012; Schuler et al., 2017). La capacidad que tiene un bosque de capturar Carbono atmosférico tiende a disminuir con el incremento de la edad del arbolado. Así en edades tempranas o intermedias es mayor la tasa de captura de Carbono (López-Reyes et al., 2016). Además, está relacionada con la velocidad de acumulación de biomasa aérea y radicular que los bosques tienen con el crecimiento neto de los árboles, que son capaces de secuestrar más CO₂ del que emiten a través de la respiración. La velocidad de captura de Carbono es directamente proporcional a dicho crecimiento (Casiano-Domínguez et al., 2018).

Las áreas naturales protegidas (ANP) tienen como finalidad la conservación, protección y recuperación de los recursos naturales (González et al., 2014; Íñiguez et al., 2014). Tal es el caso del Parque Nacional El Chico, el cual es un proveedor de importantes servicios ambientales para la región montañosa del centro de México, y que alberga uno de los relictos más importantes de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham.

(oyamel) (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2005). Esta especie se desarrolla en condiciones húmedas (precipitación mayor a 1 000 mm) y en temperaturas bajas (temperatura media de 7 a 12 °C), por lo que el incremento de la temperatura en el planeta provoca afectaciones que se manifiestan en modificaciones a nivel molecular, morfológico y fisiológico que, asu vez, se reflejan en alteraciones negativas en sus primeras etapas de desarrollo (Romahn-Hernández *et al.*, 2020).

El desarrollo inicial del bosque templado es conocido como etapa de brinzal, que incluye árboles de hasta aproximadamente 1.5 m de altura y diámetro basal menor a 5 cm, en promedio (Aguilar, 2018; Hutchinson, 1993; Ronquillo-Gorgúa *et al.*, 2022). En la mayoría de las ANP de clima templado, el brinzal se establece durante el primer periodo de lluvias, después de generarse claros en el dosel que permiten la entrada de radiación solar hasta el piso forestal (Lara-González *et al.*, 2009). Generalmente, se tienen densidades de hasta 6 100 plántulas ha⁻¹ en exposiciones oeste (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2015) que con el paso del tiempo se reducen debido a la competencia por factores abióticos y bióticos que alcanzan una acumulación gradual de biomasa en la parte aérea y radicular del árbol (Bar-On *et al.*, 2018; Ronquillo-Gorgúa *et al.*, 2022).

Los estudios enfocados a estimar la acumulación de biomasa aérea en los bosques (Albers *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2018; Pham *et al.*, 2019; Razo *et al.*, 2015), no consideran la biomasa radicular (Adame *et al.*, 2017; Addo-Danso *et al.*, 2016; Sochacki *et al.*, 2017). Investigaciones recientes sugieren la necesidad de conocer estimaciones puntuales por componente del total de biomasa forestal a gran escala (Bar-On *et al.*, 2018; Djomo *et al.*, 2011; Fu *et al.*, 2017).

La maquinaria, herramienta y tiempo para extraer con raíz árboles adultos es casi imposible de tener, pero el aporte de información del componente radicular de árboles jóvenes permite complementar información para llegar a la totalidad de biomasa almacenada en el bosque. Fragoso-López *et al.* (2017) estimaron el componente de biomasa aérea a través de sistemas de información geográfica;

asimismo, se conoce la biomasa almacenada sobre la superficie del suelo, conocida como necromasa (Cortés-Blobaum et al., 2019), de modo que hace falta incorporar una parte del componente radicular en este ecosistema. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue estimar la capacidad de acumulación de biomasa total (aérea-raíz) en árboles en etapa de brinzal de *A. religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el ANP Parque Nacional El Chico, localizado en el extremo occidental de la Sierra de Pachuca, Hidalgo, en el Eje Neovolcánico Transversal (Figura 1). Se sitúa entre los 20°10'10" a 20°13'25" norte y los 98°41'50" a 98°46'02" oeste, con una extensión de 2 739 ha, y altitudes entre 2 600 y 3 050 m (Conanp, 2005).

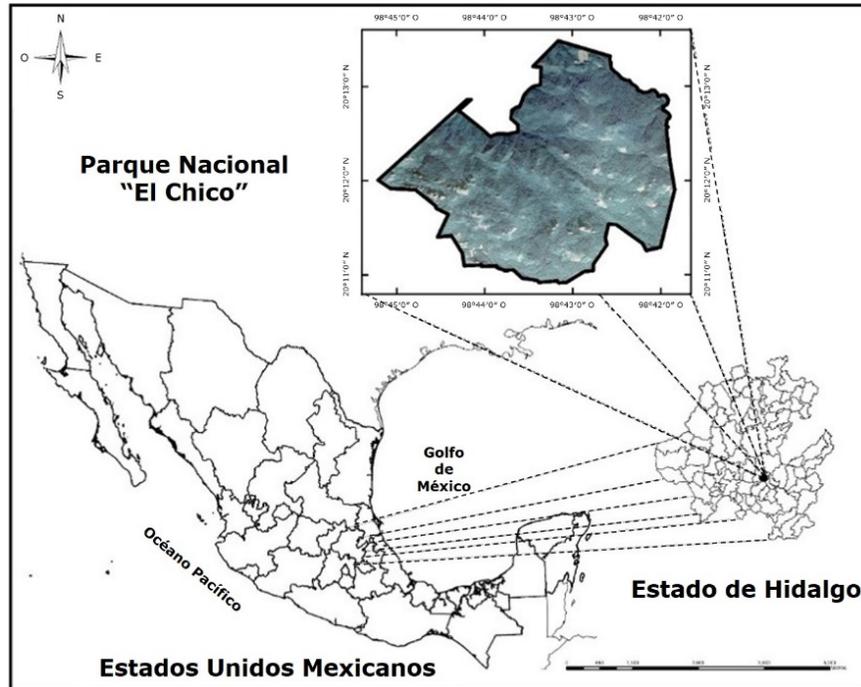


Figura 1. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

El clima es templado-subhúmedo, con lluvias en verano (C(m)(w)b(i₀)gw) y temperatura media anual de entre 12 y 18 °C. Los suelos predominantes son Cambisol húmico, Regosol dístico y Andosol húmico de textura media (Conanp, 2005). El mayor porcentaje de la cobertura vegetal (67 %) pertenece al bosque de *A. religiosa* (Fragoso-López *et al.*, 2017); otras especies arbóreas importantes son: *Quercus* spp., *Pseudotsuga macrolepis* Flous, *Taxus globosa* Schltldl. y *Pinus* spp. (Conanp, 2005).

Densidad de árboles en etapa de brinzal

Para determinar la densidad se establecieron cuatro parcelas de 100 m² (10×10 m) en áreas de regeneración de oyamel, de las cuales se extrajeron los brinzales completos con raíz.

Selección de árboles para análisis de biomasa aérea-raíz

Se realizaron recorridos dentro del Parque Nacional El Chico para identificar espacios (claros) dentro del bosque lo suficientemente amplios con regeneración natural de oyamel. Se seleccionaron en total 52 árboles de *A. religiosa* en etapa brinzal, con alturas promedio de 6-150 cm (Ronquillo-Gorgúa et al., 2022), libres de daños mecánicos, alejados de caminos o brechas con suelo compactado, y se extrajeron por completo desde la raíz.

A cada árbol se le retiró la materia orgánica con un rastrillo, después se agregó, de manera paulatina, suficiente agua alrededor de la base del ejemplar con el fin de ablandar la tierra y retirarla al siguiente día, se procuró no dañar la raíz. Para ello, se utilizó un rociador de mochila de agua a presión y se siguió la dirección y profundidad de cada raíz (una a la vez) hasta asegurar la extracción completa del sistema radicular. Se implementó un soporte de madera en forma de escuadra fijado al suelo, que ayudó a mantener el árbol en posición vertical; en la parte media del fuste se les ató con cuerdas de plástico durante todo el proceso de extracción, hasta que el sistema radicular estuviera completamente libre.

Variables evaluadas

A cada árbol se le midió la altura total (cm), desde la superficie del suelo hasta el ápice, con un flexómetro marca *Truper*[®] modelo FCN-3M; el diámetro basal (cm), con vernier digital marca *Truper*[®] modelo 14388 y precisión milimétrica; la edad se determinó por el número de verticilos en cada individuo, dado que estos se producen a una tasa de un verticilo por año en *Abies* Mill. (Lara-González *et al.*, 2009). El sistema radicular completo de cada individuo se lavó y dejó secar al aire bajo sombra por aproximadamente dos horas (Fonseca *et al.*, 2009); enseguida se registró el peso fresco del árbol (g) completo en campo con una báscula marca *Biobase*[®] modelo BE16001. Posteriormente, se separaron la parte aérea y radicular para pesar cada componente y se depositaron por separado en bolsas de papel etiquetadas con el número de muestra y fueron colocadas en estufa de secado marca *GRIEVE*[®] modelo LW-201C a 80 °C hasta alcanzar peso constante. Con ello, se calculó el promedio de peso seco (*g*) por componente y se multiplicó por la cantidad de plantas de oyamel por hectárea.

En un primer análisis se determinó la varianza del peso seco de la raíz con la siguiente fórmula:

$$n = \frac{(t^2 \sigma^2)}{d^2}$$

Donde:

t = Valor estandarizado del error a 5 %, que equivale a 1.96

σ^2 = Varianza del atributo por evaluar

d = Intervalo de confianza para la cualidad medida (Zar, 2010)

Análisis de datos

Con la información de los 52 árboles incluidos en la muestra, se realizó un análisis de agrupamiento con base en las variables altura, peso seco del árbol completo, peso seco de la raíz y porcentaje de biomasa radicular, mediante el método de *Ward* con base en distancias Euclidianas; para ello, se utilizó el programa *Statistica* v.10 (StatSoft Inc., 2011). La biomasa seca de raíz fue contrastada con una prueba de *t* para muestras desbalanceadas, previa prueba de normalidad. Para este análisis se utilizó el programa *Past* (Hammer et al., 2001). Y el resto de los atributos se contrastaron con pruebas pareadas paramétricas o no paramétricas de acuerdo con el tipo de datos.

Resultados y Discusión

El análisis de agrupamiento indicó la formación de dos grupos que se distinguen principalmente por presentar una menor talla (brinzal inicial), con un intervalo de altura de 6 a 65 cm, 0.07 a 0.9 cm de diámetro basal y edad de 1 a 8 años; además de otro de mayor talla (brinzal desarrollado) con un intervalo de altura de 68 a 150 cm, 0.9 a 2.1 cm de diámetro basal y edad de 8 a 12 años. Los datos de biomasa radicular se distribuyeron de manera normal (*Anderson-Darling*, 0.4669 y 0.3743; $p > 0.05$) con 38 individuos de brinzal inicial y 14 de brinzal desarrollado; por otro lado, no se obtuvieron diferencias significativas entre grupos de brinzales

($t=1.7468$; $p=0.09$). Para la altura los valores fueron: $t=5.47$ y $p=0.0001$; peso seco parte aérea: $t=5.435$ y $p=0.0001$; y peso seco de raíz: $t=5.482$ y $p=0.0001$.

La organización de dos grupos se debe, posiblemente, a la edad de los ejemplares y las diferencias en la biomasa formada y acumulada (Figura 2), además de los cambios en la formación de raíces en edades tempranas, por lo que no es posible asumir un incremento lineal a lo largo de la vida de la planta.

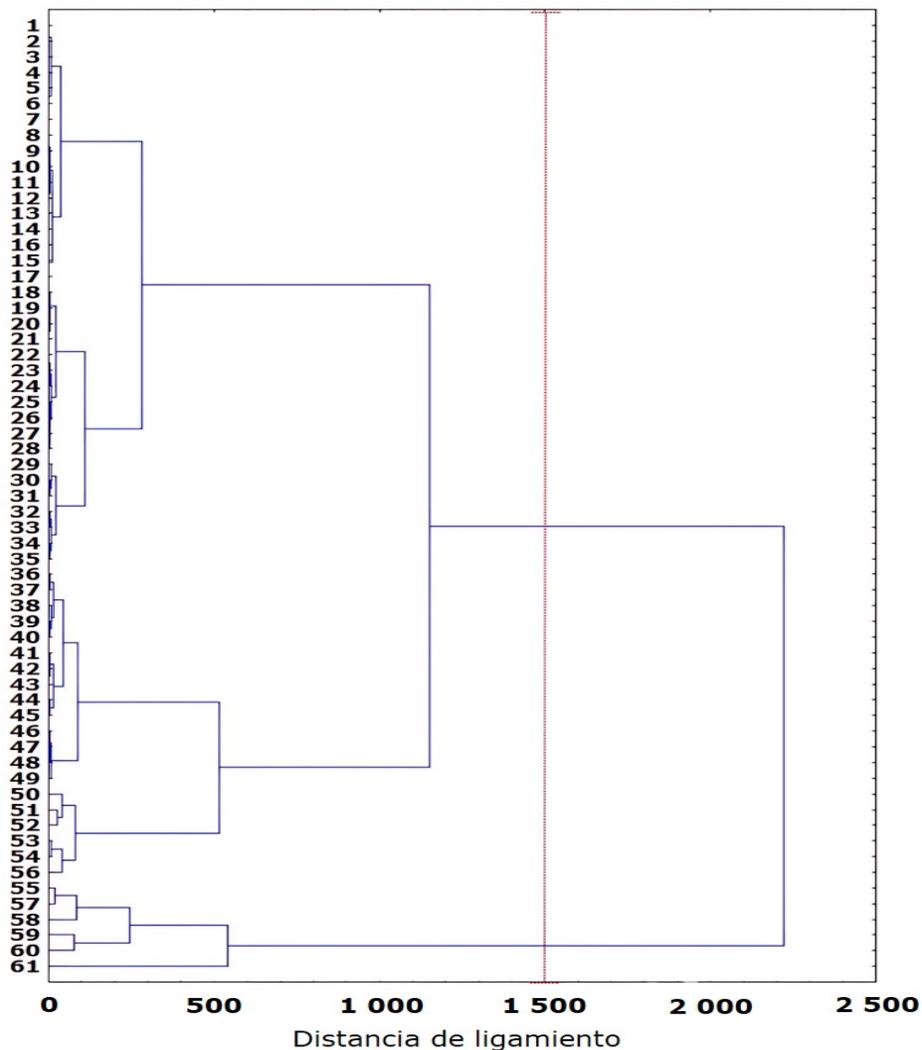


Figura 2. Agrupamiento por atributos morfológicos en plantas de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham. en etapa de brinzal en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

Algunos trabajos mencionan que la proporción de biomasa aérea-biomasa raíz son interdependientes, lo que destaca la importancia en el equilibrio funcional de ambas partes (van Noordwijk & Willigen, 1987). Sin embargo, la tasa de crecimiento de ambos elementos difiere en función del contenido hídrico del suelo, procesos biofísicos, cambios en la tasa de elongación foliar, estrés de la planta, hacinamiento y competencia, entre otros (Krizek et al., 1985; Macklon et al., 1994).

Biomasa por componente

Los resultados en biomasa seca por componente indicaron que los árboles en el grupo brinzal inicial tienen 72.6 % de biomasa aérea y 27.4 % de biomasa radicular (Figura 3); mientras en el grupo brinzal desarrollado, 75.8 % corresponde a biomasa aérea y 24.2 % a biomasa radicular (Figura 4). Es conveniente que esta tasa de cambio se considere para estimar la cantidad de Carbono en áreas de regeneración, sobre todo cuando el espacio presenta mayor abundancia de plantas jóvenes. Estudios previos han demostrado la existencia de un incremento significativo de hasta cinco puntos porcentuales en la producción de raíces en suelos restrictivos (Guerra et al., 2005); lo que podría modificar los resultados obtenidos, si se contrastaran bajo condiciones con calidad nutrimental inferior del suelo.

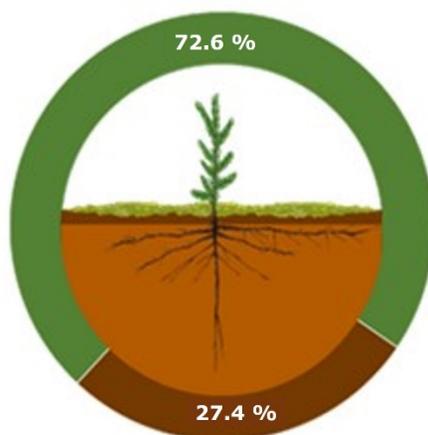


Figura 3. Biomasa aérea y radicular en árboles de brinzal inicial (6 a 65 cm de altura).

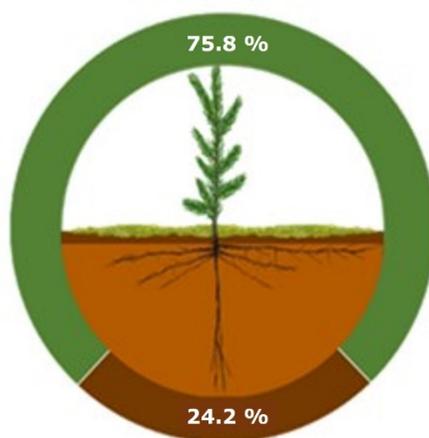


Figura 4. Biomasa aérea y radicular en árboles de brinzal desarrollado (68 a 150 cm de altura).

Diversos autores estiman que de 20 a 40 % de la biomasa de los bosques está compuesta por raíces (Brunner & Godbold, 2007; Finér et al., 2011; Sochacki et al., 2017); sin embargo, esta biomasa cambia de acuerdo con la especie, el clima y las características del ecosistema en el que se desarrollan.

Potencial de biomasa acumulada

Se estimó una densidad de regeneración promedio de 3 925 árboles ha⁻¹ en etapa de brinzal, pero este resultado podría estar sobreestimado ya que los sitios de muestreo se ubicaron en espacios claros del dosel, donde las condiciones ambientales permitieron el establecimiento de la regeneración de *A. religiosa*; pero bajo el dosel de los árboles adultos, la densidad fue escasa debido a la poca radiación solar que llega al piso forestal y regularmente las plantas no se establecen (Lara-González et al., 2009). Hernández et al. (2022) presentan datos contrastantes, ellos señalan 79 % ($n=803$) de plántulas muertas bajo dosel parcialmente cerrado; en condiciones de claros de luz registran 70.1 % ($n=384$); y 17.9 % ($n=182$) de plántulas vivas bajo un dosel parcialmente cerrado, mientras que en claros de luz fue de 28.1 % ($n=154$).

Por otra parte, el potencial de biomasa total (aérea y raíz) almacenada en *A. religiosa* en etapa de brinzal fue de 103.6 kg ha⁻¹ (Figura 5). Cabe destacar que la relación parte aérea-raíz calculada fue de 3:1; es decir, tres partes corresponden a biomasa aérea y una parte a biomasa radicular. Esto contribuye a mantener el Carbono orgánico (CO) bajo el suelo, al inducir su estabilidad mediante el proceso de mineralización que ocurre con el tiempo. Xia et al. (2022) indican que la lignina contenida en la madera de las raíces es un componente recalcitrante que estabiliza el CO del suelo durante décadas, y los bosques de oyamel tienen un alto contenido de lignina, al igual que los de pino (Avendaño et al., 2009; Leifeld & Kögel-Knabner, 2005).

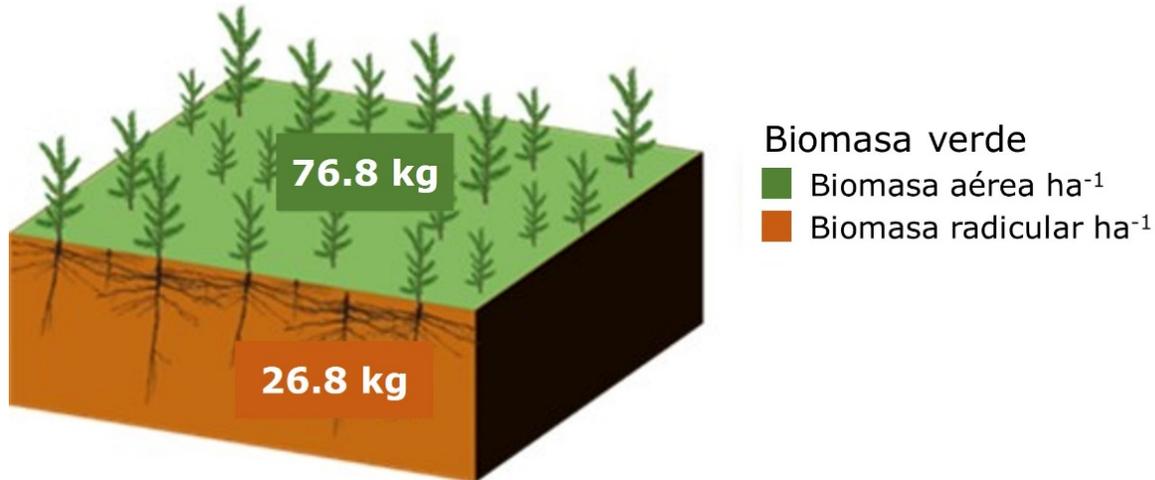


Figura 5. Potencial de almacenamiento de biomasa aérea y radicular por hectárea de árboles de oyamel en etapa de brinzal en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

La competencia de raíces es mayor cuando crecen con otras estructuras radiculares, por lo que esto es un factor que influye en su conformación, extensión y distribución en el suelo, y en ocasiones tiende a reducir su profundidad, diseño y densidad (Bolte & Villanueva, 2006; Curt & Prévosto, 2003; Rewald & Leuschner, 2009). De esta forma, podría reducirse el porcentaje de biomasa radicular durante el crecimiento de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico.

Conclusiones

Los bosques de *Abies religiosa* en la etapa de brinzal tienen potencial de acumular biomasa aérea-raíz en una relación 3:1 en claros del dosel, donde las condiciones permiten el establecimiento de la regeneración natural. Las plantas pequeñas, de 1

a 8 años en promedio, almacenan más biomasa radicular en porcentaje que las plantas de mayor tamaño, con edad de 8 a 12 años en la misma etapa de brinzal. La relación de biomasa radicular respecto a la biomasa aérea en etapa de brinzal cambia con la edad en árboles de *Abies religiosa*.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por la beca económica otorgada al primer autor, la cual permitió realizar esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Nancy Manzur Chávez: toma de datos en campo, interpretación de resultados, estructura y redacción del manuscrito; Rodrigo Rodríguez Laguna: diseño del formato de campo, revisión y corrección del manuscrito; Ramón Razo Zárate: revisión, diseño e interpretación de los resultados y revisión del manuscrito; Otilio Arturo Acevedo Sandoval: interpretación de los resultados y revisión del manuscrito; Pablo Octavio Aguilar: análisis de los datos de campo, interpretación de resultados, revisión y redacción del manuscrito.

Referencias

- Adame, M. F., Cherian, S., Reef, R. & Stewart-Koster, B. (2017). Mangrove root biomass and the uncertainty of belowground carbon estimations. *Forest Ecology and Management*, 403, 52-60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.016>
- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E. & Smith, A. R. (2016). Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. *Forest Ecology and Management*, 359, 332-351. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>
- Aguilar L., J. M. E. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería en el estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 230-253. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.154>
- Albers, A., Collet, P., Benoist, A. & Hélias, A. (2019). Data and non-linear models for the estimation of biomass growth and carbon fixation in managed forests. *Data in Brief*, 23, Article 103841. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103841>
- Avendaño H., D. M., Acosta M., M., Carrillo A., F. y Etchevers B., J. D. (2009). Estimación de biomasa y Carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(3), 233-238. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v32n3/v32n3a11.pdf>
- Bar-On, Y. M., Phillips, R. & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 1-6. https://www.researchgate.net/publication/325276009_The_biomass_distribution_on_Earth
- Bolte, A. & Villanueva, I. (2006). Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *European Journal of Forest Research*, 125, 15-26. <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0075-5>
- Brunner, I. & Godbold, D. L. (2007). Tree roots in a changing world. *Journal of Forest Research*, 12, 78-82. <https://doi.org/10.1007/s10310-006-0261-4>

Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covaleda-Ocon, S. y Aryal, D. R. (2018). El Carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24, Artículo e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2005). *Programa de conservación y manejo Parque Nacional El Chico*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <http://centro.paot.org.mx/documentos/ine/chico.pdf>

Cortés-Blobaum, H. J., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., Prieto-García, F., Fragoso-López, P. I. y Razo-Zárata, R. (2019). Patrones culturales de uso de leña en la primera área protegida de Latinoamérica, El Chico, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 6(2), 15-26. <http://reibci.org/publicados/2019/abr/3400108.pdf>

Curt, T. & Prévosto, B. (2003). Root biomass and rooting profile of naturally regenerated beech in mid-elevation Scots pine woodlands. *Plant Ecology*, 167, 269-282. <https://doi.org/10.1023/A:1023904912712>

Djomo, A. N., Knohl, A. & Gravenhorst, G. (2011). Estimations of total ecosystem carbon pools distribution and carbon biomass current annual increment of a moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1448-1459. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.01.031>

Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K. & Hirano, Y. (2011). Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 261(2), 265-277. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.016>

Fonseca G., W., Alice G., F. y Rey B., J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47. <https://www.scielo.cl/pdf/bosque/v30n1/art06.pdf>

Fragoso-López, P. I., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., González-Ramírez, C. A., Valdéz-Lazalde, J. R., Cortés-Blobaum, H. J. & Razo-Zárata, R. (2017). Carbon sequestration in protected areas: A case study of an *Abies religiosa*

- (H. B. K.) Schlecht. et Cham forest. *Forests*, 8(11), 429. <https://doi.org/10.3390/f8110429>
- Fu, L., Zeng, W. & Tang, S. (2017). Individual tree biomass models to estimate forest biomass for large spatial regions developed using four pine species in China. *Forest Science*, 63(3), 241-249. <https://doi.org/10.5849/FS-2016-055>
- González O., H. A., Cortés-Calva, P., Íñiguez D., L. I. y Ortega-Rubio, O. (2014). Las áreas naturales protegidas de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (60), 7-15. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67431160002.pdf>
- Guerra C., J., Gayoso A., J., Schlatter V., J. y Nespolo R., R. (2005). Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque*, 26(1), 5-21. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002005000100002>
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electrónica*, 4(1), 1-9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
- Hernández R., V., López-Mata, L., Cruz-Rodríguez, J. A. y Luna C., M. (2022). Nicho de regeneración de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham. en el Monte Tláloc, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, México. *Botanical Sciences*, 100(2), 331-344. <https://doi.org/10.17129/botsci.2912>
- Hutchinson, I. D. (1993). *Puntos de partida y muestreo diagnóstico para la silvicultura de bosques naturales del trópico húmedo*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. https://www.google.com.mx/books/edition/Puntos_de_partida_y_muestreo_diagn%C3%B3stic/qRAIjOzSDAwC?hl=es&gbpv=1
- Íñiguez D., L. I., Jiménez S., C. L., Sosa R., J. y Ortega-Rubio, A. (2014). Categorías de las áreas naturales protegidas en México y una propuesta para la evaluación de su efectividad. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (60), 65-70. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67431160008.pdf>

- Krizek, D. T., Carmi, A., Mirecki, R. M., Snyder, F. W. & Bunce, J. A. (1985). Comparative effects of soil moisture stress and restricted root zone volume on morphogenetic and physiological responses of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Journal of Experimental Botany*, 36(1), 25-38. <https://doi.org/10.1093/jxb/36.1.25>
- Lara-González, R., Sánchez-Velázquez, L. R. & Corral-Aguirre, J. (2009). Regeneration of *Abies religiosa* in canopy gaps versus understory, Cofre de Perote National Park, México. *Agrociencia*, 43(7), 739-747. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n7/v43n7a8.pdf>
- Leifeld, J. & Kögel-Knabner, I. (2005). Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma*, 124(1-2), 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.04.009>
- Litton, C. M., Raich, J. W. & Ryan, M. G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 13(10), 2089-2109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x>
- López-Reyes, L. Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Zavala-Cruz, J., Gómez-Guerrero, A. y Posada-Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y Bosques*, 22(3), 49-60. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231456>
- Macklon, A. E. S., Mackie-Dawson, L. A., Sim, A., Shand, C. A. & Lilly, A. (1994). Soil P resources, plant growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant and Soil*, 163, 257-266. <https://doi.org/10.1007/BF00007975>
- Oliveira, N., Rodríguez-Soalleiro, R., Pérez-Cruzado, C., Cañellas, I., Sixto, H. & Ceulemans, R. (2018). Above-and below-ground carbon accumulation and biomass allocation in poplar short rotation plantations under Mediterranean conditions. *Forest Ecology and Management*, 428, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.06.031>
- Peichl, M., Leava, N. A. & Kiely, G. (2012). Above-and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and

- adjacent intensively managed grassland. *Plant and Soil*, 350(1), 281-296. https://www.researchgate.net/publication/225448541_Above-_and_belowground_ecosystem_biomass_carbon_and_nitrogen_allocation_in_recently_afforested_grassland_and_adjacent_intensively_managed_grassland
- Pham, M. V., Pham, T. M., Du, Q. V. V., Bui, Q. T., Tran, A. V., Pham H. M. & Nguyen, T. N. (2019). Integrating Sentinel-1A SAR data and GIS to estimate aboveground biomass and carbon accumulation for tropical forest types in Thuan Chau district, Vietnam. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.03.003>
- Razo Z., R., Gordillo M., A. J., Rodríguez L., R., Maycotte M., C. C. y Acevedo S., O. A. (2015). Coeficientes de Carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31), 58-67. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i31.195>
- Rewald, B. & Leuschner, C. (2009). Belowground competition in a broad-leaved temperate mixed forest: pattern analysis and experiments in a four-species stand. *European Journal of Forest Research*, 128, 387-398. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0276-4>
- Rodríguez-Laguna, R., Razo-Zárate, R., Fonseca-González, J., Capulín-Grande, J. y Goche-Telles, R. (2015). Regeneración natural post-incendio de *Abies religiosa* (H. B. K.) Schl. et Cham, en el Parque Nacional "El Chico" Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(2), 11-22. <http://www.reibci.org/publicados/2015/marzo/0900104.pdf>
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I. y Pérez-Hernández, M. de J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Revista Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8(22), Artículo 10. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.72751>
- Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, O. A., Hernández-Ortiz, J. & Manzur-Chávez, N. (2022). Carbon storage during the

development stages of *Pinus patula* Schiede ex Schlttdl. & Cham. in the Sierra Alta of Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 483-497. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.02.009>

Schuler, J., Bragg, D. C. & McElligott, K. (2017). Biomass estimates of small diameter planted and natural-origin loblolly pines show major departures from the national biomass estimator equations. *Forest Science*, 63(3), 319-330. <https://doi.org/10.5849/FS-2016-047>

Sochacki, S. J., Ritson, P., Brand, B., Harper, R. J. and Dell, B. (2017). Accuracy of tree root biomass sampling methodologies for carbon mitigation projects. *Ecological Engineering*, 98, 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.004>

StatSoft Inc. (2011). *STATISTICA (data analysis software system). Versión 10*. www.statsoft.com

van Noordwijk, M. & de Willigen, P. (1987). Agricultural concepts of roots: from morphogenetic to functional equilibrium between root and shoot growth. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35(4), 487-496. <https://doi.org/10.18174/njas.v35i4.16707>

Xia, M, Valverde-Barrantes, O. J., Suseela, V., Blackwood, C. B. & Tharayil, N. (2022). Characterizing natural variability of lignin abundance and composition in fine roots across temperate trees: a comparison of analytical methods. *New Phytologist*, 236(6), 2358-2373. <https://doi.org/10.1111/nph.18515>

Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis*. Prentice Hall. https://books.google.com.mx/books/about/Biostatistical_Analysis.html?id=LCRFAQAAIAAJ&redir_esc=y



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