

INFLUENCIA DE TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA ARBÓREA¹

INFLUENCE OF SILVICULTURAL TREATMENTS ON THE ACCUMULATION OF TREE BIOMASS

Ambrosio-Lazo, A.^{1*}; Rodríguez-Ortiz, G.¹; Santiago-García, W.²; Lozano-Trejo, S.¹

¹ *Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Ex Hacienda de Nazareno, C.P. 71233, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.*

² *Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Cam. a la Universidad, C. P. 68725, Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.*

*Autor para correspondencia: ashmir26@gmail.com

Fecha de envío: 31, mayo, 2025

Fecha de publicación: 10, diciembre, 2025

Resumen:

Actualmente el CO₂ que se encuentra en la atmósfera genera una preocupación mundial, debido al cambio climático que conlleva; por ello los bosques se presentan como una solución viable. Por otro lado, cuantificar la biomasa forestal arbórea de un bosque bajo manejo es importante para evaluar la productividad y el efecto de tratamientos silvícolas (TS) aplicados. El objetivo de este trabajo fue analizar la biomasa arbórea en rodales bajo TS aplicados, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, y validar la información con teledetección. En 2025 se establecieron de manera aleatoria 49 sitios (UM) en siete tratamientos silvícolas: segundo aclareo (2A), tercer aclareo (3A), corta de liberación y preaclareo (CL), selección (S), matarrasa a 10 años (M10), matarrasa a 20 años (M20) y área sin manejo (ASM). Se realizó el inventario arbóreo bajo la metodología de la Reserva de Acción Climática (CAR), para estimar la biomasa arbórea. Posteriormente se descargó la imagen satelital del área de estudio, a través de *Sentinel 2*; para ajustar un modelo lineal simple en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (10 m pixel⁻¹). Los tratamientos se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado y comparación de medias (Duncan, 0.05). En la biomasa arbórea (t ha⁻¹), se observaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0.01$) del ASM (390.6 t ha⁻¹) sobre las áreas bajo M10 (40.4 t ha⁻¹), M20 (187.7 t ha⁻¹) y CL (169.2 t ha⁻¹). Por otro lado, no hubo diferencias estadísticas significativas entre los datos de biomasa estimada en campo vs los espectrales calculados con el NDVI ($p > 0.05$). El NDVI explicó el 83% de la variación existente de la biomasa arbórea. Determinar la biomasa arbórea es el primer paso para conocer los montos de carbono en un ecosistema. En un plan estratégico forestal validar los datos biomasa con teledetección, brinda información viable, para lograr reducir costos y tiempo a gran escala.

Palabras clave: Ixtlán de Juárez, matarrasa, NDVI, reserva de acción climática.

Abstract:

Currently, atmospheric CO₂ is a global concern due to the climate change it entails; therefore, forests are presented as a viable solution. Furthermore, quantifying the tree biomass of a managed forest is important for evaluating productivity and the effect of applied silvicultural treatments (TS). The objective of this study was to analyze tree biomass in stands under applied TS in Ixtlán de Juárez, Oaxaca, and to validate the information with remote sensing. In 2025, 49 sites (UM) were randomly established in seven silvicultural treatments: second thinning (2A), third thinning (3A), release felling and pre-thinning (CL), selection (S), 10-year clearcutting (M10), 20-year clearcutting (M20), and unmanaged area (ASM). A tree inventory was conducted using the Climate Action Reserve (CAR) methodology to estimate tree biomass. Satellite images of the study area were then downloaded using Sentinel 2 to fit a simple linear model based on the normalized difference vegetation index (NDVI) (10 m pixels⁻¹). Treatments were differentiated using a generalized linear model and comparison of means (Duncan, 0.05). In tree biomass (t ha⁻¹), statistically significant differences (p<0.01) were observed between ASM (390.6 t ha⁻¹) and areas under M10 (40.4 t ha⁻¹), M20 (187.7 t ha⁻¹), and CL (169.2 t ha⁻¹). On the other hand, there were no statistically significant differences between the biomass data estimated in the field and the spectral data calculated with the NDVI (p>0.05). The NDVI explained 83% of the existing variation in tree biomass. Determining tree biomass is the first step in understanding the amounts of carbon in an ecosystem. In a strategic forest plan, validating biomass data with remote sensing provides viable information to achieve cost and time reduction on a large scale.

Keywords: Ixtlán de Juárez, clearcutting, NDVI, climate action reserve

INTRODUCCIÓN

Actualmente el cambio climático derivado de los gases de efecto invernadero, genera una problemática mundial, lo que lleva a la búsqueda de alternativas para la mitigación de dichos gases (en particular el CO₂). Entre las soluciones más viables se encuentra la captura de CO₂ por parte de los bosques, por ello, es necesario comprender mejor cuanto contribuyen los bosques bajo manejo maderable y conservación al ciclo global del carbono y al control de gases de efecto invernadero (Jiménez-Pérez et al., 2018; Köhl et al., 2015); El primer paso para conocer los montos de carbono que captura un bosque en un área determinada, es estimar la cantidad de biomasa arbórea acumulada (Guzmán-Santiago et al., 2024; Rodríguez-Ortiz et al., 2019)

Los ecosistemas forestales tienen un alto potencial para la captura de C, cuantificar la biomasa forestal de un área bajo manejo ayuda a conocer mejor la dinámica del C. Por otro lado, estimar la cantidad de biomasa que almacenan los árboles en sus estructuras es complejo, dado que el proceso de acumulación es dinámico, y está en función de la composición de especies, edad, tamaño de los componentes arbóreos, la densidad

residual, regeneración, entre otros; además de factores de sitio, como: altitud, pendiente, exposición; y variables climáticas y atmosféricas (Chávez-Aguilar et al., 2016; García-Aguilar et al., 2015).

Los tratamientos silvícolas aplicados modifican los patrones de partición y acumulación de biomasa arbórea residual; cada método y tratamiento silvícola aplicado afecta de forma distinta, aumentándola o disminuyéndola (Ambrosio-Lazo et al., 2024; Chávez-Pascual et al., 2017); por ello, la finalidad de estos estudios es conocer la dinámica de la biomasa forestal arbórea en áreas bajo diferentes tratamientos silvícolas, y así poder determinar los reservorios de carbono de forma eficiente y optima; considerando que estos son una fuente de ingresos para las comunidades forestales (Cortés-Pérez et al., 2021).

A nivel global, en el año 2022 las emisiones antropogénicas totales de carbono fueron de 11.1 Gt año^{-1} , de las cuales los bosques absorbieron en promedio $3.3 \text{ Gt año}^{-1} \pm 0.8 \text{ Gt año}^{-1}$ (Friedlingstein et al., 2023). Actualmente en México, los bosques de clima templado son importantes para la producción forestal, de ellos se obtiene 80.71% de la producción maderable (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2020).

Los métodos destructivos y empíricos comúnmente utilizados para estimar el C forestal, son tardados, costosos y no factibles a gran escala (Amiri & Pourghasemi, 2022; Muhe & Argaw, 2022); por ello, el uso de imágenes satelitales obtenidas a través de la teledetección ayuda a evaluar reservas de biomasa y carbono a diferentes escalas espaciales y temporales; obteniendo como resultado datos precisos, para un manejo optimo del bosque (Dou & Yang, 2018; Vashum & Jayakumar, 2012).

En México el 60% de los bosques pertenece a comunidades locales, las cuales practican el manejo forestal comunitario; estos bosques les proporcionan beneficios ambientales, económicos y sociales; uno en particular es la captura de CO_2 , el cual puede vincular a las comunidades al mercado voluntario de carbono, obteniendo beneficios económicos por tonelada capturada anualmente (Leyva-Pablo et al., 2021; Torres-Rojo et al., 2016); por ello el objetivo fue evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas sobre los contenidos de biomasa arbórea en el bosque de Ixtlán de Juárez, y posteriormente realizar una validación con teledetección.



MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó en el bosque bajo manejo maderable de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, con coordenadas: 17°21'24" y 17°21'08" N, 96°28'59" y 96°28'26" W; y altitud promedio de 2050 m (Figura 1). El área bajo manejo cuenta con especies de importancia maderable como: *P. patula* Schl. et Cham, *P. oaxacana* Mirov, *P. pseudostrobus* Lindl., *Quercus rugosa* Née, *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. *Arbutus xalapensis* Kunth y *Alnus acuminata* Kunth.

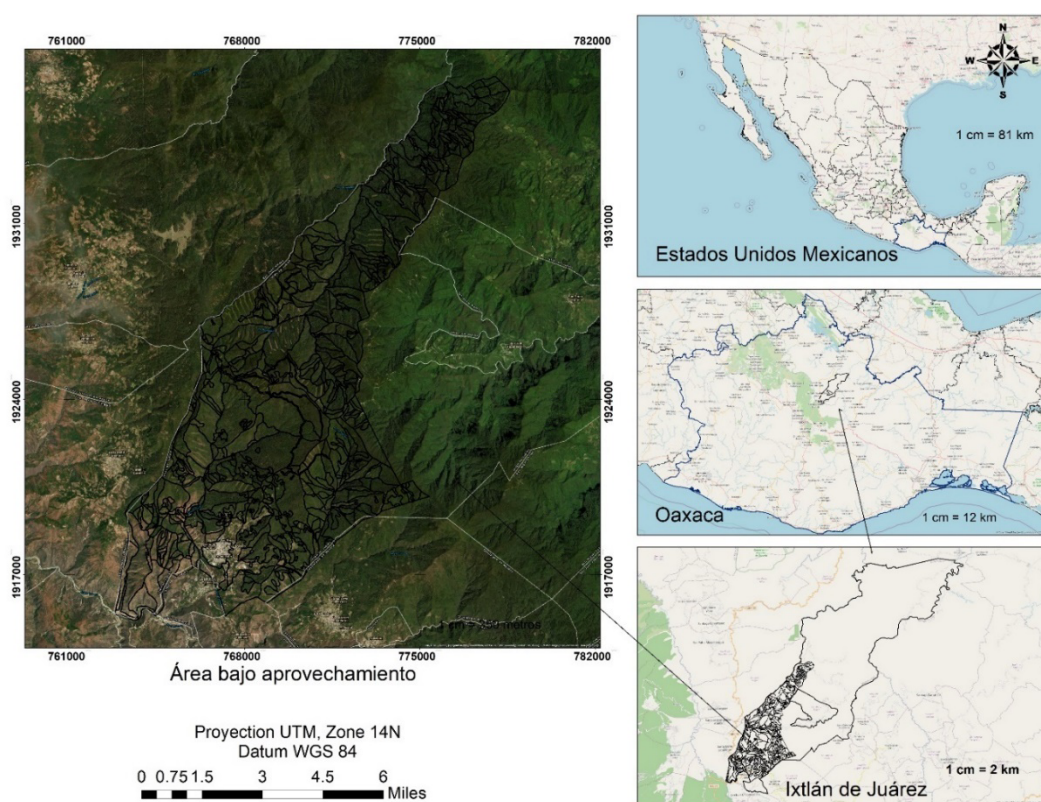


Figura 1. Área de estudio, en donde se aplicaron los tratamientos silvícolas.

Figure 1. Study area, where silvicultural treatments were applied.

Establecimiento de los sitios de muestreo

Para evaluar el contenido de biomasa en rodales bajo distintos tratamientos silvícolas (TS); en el año 2025, se establecieron 49 sitios de muestreo de 400 m² de forma aleatoria, bajo el protocolo forestal para México vol. 3.0, de la Reserva de Acción Climática (CAR);

evaluando siete tratamientos silvícolas (TS) aplicados durante el periodo 2014-2015. Los tratamientos fueron los siguientes: a) segundo aclareo (2A) y b) tercer aclareo (3A), los cuales son cortas intermedias para regular la densidad arbórea; c) corta de liberación y preaclareo (CL), el cual se aplica 10 años después de la corta de regeneración (cosecha) sobre los árboles padres residuales; d) matarrasa en franjas a 10 años (M10) y e) matarrasa en franjas a 20 años (M20) (aplicado en el año 2005), las cuales son cortas intensivas en franjas; f) selección individual (S), el cual se aplica bajo diámetro mínimo de corta, y g) área sin manejo (ASM). Para para esto se tomó el 5% de la superficie de cada rodal bajo distinto TS (CAR, 2023).

Los sitios se geo-posicionaron con la ayuda de un GPS (*global positioning system*) (Garmin eTrex 30, USA®) MAPS 6. En los sitios se midieron los árboles vivos y muertos ≥ 30 cm de DN y ≥ 3 m de altura; y en otro radio de 5.64 m (dentro de la misma parcela) se consideraron arboles ≥ 5 cm y < 30 cm de DN. Se registró: diámetro normal (DN, cm) con una cinta diamétrica (Hartmann®, 283D), altura total (AT, m) con un clinómetro (Haglöf®, EC II D-HS115), y diámetro de copa (DC, m) con una cinta métrica (Truper® TP50ME). Se eligió una muestra de árboles en forma proporcional a la frecuencia relativa de cada especie, a los que se extrajo una muestra (viruta) con un taladro de Pressler (Haglöf®, Sweden), o una rodaja de aproximadamente 5 cm de diámetro en latifoliadas.

Análisis de muestras

Las muestras se analizaron en el laboratorio de Agro-ecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. A las virutas y rodajas se les obtuvo su volumen verde (VV, cm^3) aplicando la fórmula de Newton (Romahn de la Vega & Ramírez, 2010). Posteriormente se introdujeron a una estufa de secado (Memmert®, 100-800) a 102°C , hasta obtener su peso constante y su peso seco (PS, g). Se obtuvo la gravedad específica (GE, kg m^{-3}) por especie, $GE = \left(\frac{PS}{VV}\right) \times 1000$; con la cual posteriormente se obtuvo la biomasa por árbol, por sitio y por tratamiento silvícola (Ambrosio-Lazo et al., 2024; Chávez-Pascual et al., 2017).

Validación con teledetección

La imagen multiespectral del área de estudio se descargó en la plataforma *Sentinel Scientific Data Hub*. La imagen constó de 13 bandas espectrales en nivel 2A, la cual tiene preprocesamientos a nivel de corrección atmosférica. La imagen se geo-proceso con el

software QGIS 3.40.3®; primero se aplicó la corrección atmosférica a cada banda. Posteriormente se realizó un juego de las bandas 3, 4 y 8 (10 m píxel⁻¹) para visualizar la vegetación en infrarrojo, y se calculó del Índice de Diferencia Normalizada (NDVI) combinando las bandas 4 (Rojo) y 8 (NIR, infrarrojo cercano). Se aplicó la fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

donde: Red y NIR son las medidas de reflectancia espectral adquiridas en las regiones roja (visible) e infrarroja cercana, respectivamente.

Se ajustaron modelos de regresión para estimar biomasa (t píxel⁻¹ y t ha⁻¹) en función del NDVI, utilizando los datos de la biomasa estimada en los sitios, y se hizo un recorte de la imagen por tratamiento silvícola. Posteriormente se realizó la expansión de biomasa por rodal y se validó a través de una prueba *t student* (p>0.05) comparando datos de campo vs. datos de la imagen multiespectral.

A las variables B (t ha⁻¹) y dasométricas se les aplicó prueba de normalidad de Shapiro Will y homogeneidad de varianzas de Bartlett ($\alpha = 0.05$); algunas variables se transformaron para el cumplimiento de los supuestos. Se realizó análisis de varianza (ANOVA) con el procedimiento Proc GLM y prueba de medias (Duncan, 0.05) para diferenciar TS. Todos los análisis fueron realizados en el programa SAS (Statistical Analysis System) (SAS Institute Inc, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre tratamientos silvícolas (TS), permitió observar las diferencias en la acumulación de la biomasa arbórea (B); con respecto a esto, se observan diferencias estadísticas significativas (p<0.01) en la acumulación de B del área sin manejo (ASM) (390.6 t ha⁻¹) sobre las áreas con aplicación matarrasa a 10 años de edad (M10) (40.4 t ha⁻¹), matarrasa a 20 años de edad (M20) (187.7 t ha⁻¹), y corta de liberación (CL) (169.2 t ha⁻¹) (Cuadro 1). Por lo que las ASM funcionan como grandes reservorios de carbono. Álvarez et al. (2012) mencionan que, en los bosques bajo conservación, los montos superiores a 150 t ha⁻¹ son excelentes reservorios de C, aunque esto depende del tipo de vegetación y de factores fisiográficos (García-Aguilar et al., 2015).

Las áreas bajo M10 y M20 tienen una alta densidad arbórea (1360 – 2334 árboles ha⁻¹), aunque por otra parte tienen bajas acumulaciones de B, atribuido a sus diámetros pequeños (9.7 a 20.7 cm) y alturas bajas (6.2 a 15.7 m) (Cuadro 1). Esto debido, a que cuando se aplicaron los tratamientos de matarrasa, fueron de forma intensiva, dejando una densidad residual nula. Con respecto a esto Chávez-Pascual et al. (2017) reportan en un área bajo matarrasa a 10 años, compuesta por *Pinus oaxacana* Mirov, valores menores a los de este estudio: 2475 árboles ha⁻¹ y 8 t B ha⁻¹. Por ello, al aplicar, cortas a matarrasa se deben ejercer tratamientos complementarios (aclareos, podas) para poder distribuir adecuadamente la densidad y aumentar la biomasa (Chávez-Aguilar et al., 2016). Por otro lado, en plantaciones forestales, el control sobre la densidad es más factible, por ejemplo: Mendoza-Ponce & Galicia, 2010, describen que en una reforestación de *P. patula* Schl. et Cham, en Veracruz, de 12 años, presenta una densidad de 3028 árboles ha⁻¹ y 218.33 t B ha⁻¹.

Cuadro 1. Efecto de los tratamientos silvícolas sobre los montos de biomasa arbórea y variables dasométricas.

Table 1. Effect of silvicultural treatments on tree biomass and dasometric variables.

Variables	Tratamientos silvícolas						
	Área sin manejo	Selección	Segundo aclareo	Tercer aclareo	Matarrasa (20 años)	Corta de liberación	Matarrasa (10 años)
B (t ha ⁻¹)	390.6±48.5a	367.3±46a	295.7±66.5a	372.6±24.7a	187.7±20.4b	169.2±33.3b	40.4±3.3c
Dn (cm)	28.7±2b	38.4±2.3a	31.4±1.4b	33.9±2.7ab	20.7±2c	21.2±1.7c	9.7±0.3d
At (m)	16.1±1cd	20.8±1.2ab	23±0.8a	19.3±1.7bc	15.7±0.6d	11.8±1.3e	6.2±0.2f
DC (m)	5.1±0.3b	7.5±0.7a	5.9±0.6ab	5.9±0.4ab	4.5±0.6bc	4.4±0.2bc	3.4±0.3c
AC (m ²)	29±2.7a	89.5±45.9a	29.6±5.3a	35±3.7a	29.3±14.4a	20.4±2a	11.8±2.3a
VTA (m ³ ha ⁻¹)	728.5±85.2a	656.7±79.7a	579.7±130.4a	670.8±38.5a	366±40.8b	295.4±59.1b	78.2±6.5c
Na ha ⁻¹	1425±153.3b	755.6±196.8b	808.3±289.2b	920.8±184.6b	1360±222.3b	1262±118.3b	2333.3±204.6a

B = biomasa arbórea, DN = diámetro normal, At = altura total, DC = diámetro de copa, AC = área de copa, VTA= volumen total árbol, Na= número de árboles. Los datos con letras distintas en hileras presentan diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). Media ± error estándar.

Las áreas bajo aclareos presentan en promedio 334.15 t B ha⁻¹, lo cual representa 97.5 % más que el área bajo CL (169.2 t B ha⁻¹); esto debido a que los aclareos son el segundo factor en importancia para controlar la estructura, la productividad, el tamaño de los árboles y la asignación de biomasa hacia los componentes estructurales de los árboles (Rodríguez-Ortíz et al., 2011). Los aclareos estimulan el crecimiento en

diámetro de los árboles y en menor medida en altura, a través del control de la densidad tanto como se requiera en cada rodal (Ambrosio-Lazo et al., 2024; Chávez-Aguilar et al., 2016).

De acuerdo a la biomasa arbórea acumulada en los rodales evaluados en Ixtlán de Juárez, estos se podrían clasificar en dos grupos; por un lado, los tratamientos no intensivos: selección ($367.3 \text{ t B ha}^{-1}$), segundo aclareo ($295.7 \text{ t B ha}^{-1}$) y tercer aclareo ($372.6 \text{ t B ha}^{-1}$); y los intensivos: M10 (40.4 t B ha^{-1}), M20 ($187.7 \text{ t B ha}^{-1}$) y CL ($169.2 \text{ t B ha}^{-1}$). A pesar de que en las cortas de matarrasa se hacen con el propósito de incrementar la productividad forestal, esta remoción afecta la diversidad de especies (Guevara Fisher et al., 2020).

Validación con imágenes satelitales

El modelo lineal sin intercepto $B = 5.00954(NDVI)$, fue el que mejor se ajustó a la estimación de B, siendo altamente significativo ($p \leq 0.01$). El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) explicó el 83% de la variación existente de la biomasa arbórea. El coeficiente de variación (CV) = 30.2% fue moderado-alto, debido a la variación en la densidad y cobertura arbórea entre los TS aplicados. La desviación estándar del modelo fue baja (1.54), lo que indica que los valores estimados de B se alejaron ligeramente de la tendencia de la media. La elección del mejor modelo depende del tipo de vegetación que se esté evaluando y del tipo de satélite óptico que se esté utilizando; por lo tanto, el evaluador es responsable de elegir el mejor (Muhe & Argaw, 2022; Vashum & Jayakumar, 2012).

El modelo se validó mediante una prueba t de Student ($\alpha = 0.05$) comparando la biomasa estimada con datos de campo vs. los estimados con datos espectrales. No se encontraron diferencias entre ambos tipos de datos ($p > 0.05$) (Figura 2). El modelo fue eficiente en la predicción de biomasa en función del NDVI; por lo que correlacionar los valores de campo con los datos espectrales proporciona información efectiva y precisa (Vaghela et al., 2021). Aguirre-Salado et al. (2012) ajustaron un modelo lineal para estimar biomasa aérea con base en el NDVI y campos de vegetación continua (CVFs) (R_2 ajustado = 0.77 CME = 6.00 t ha^{-1}), mostrando altos coeficientes de correlación de validación ($r = 0.87^{**}$).

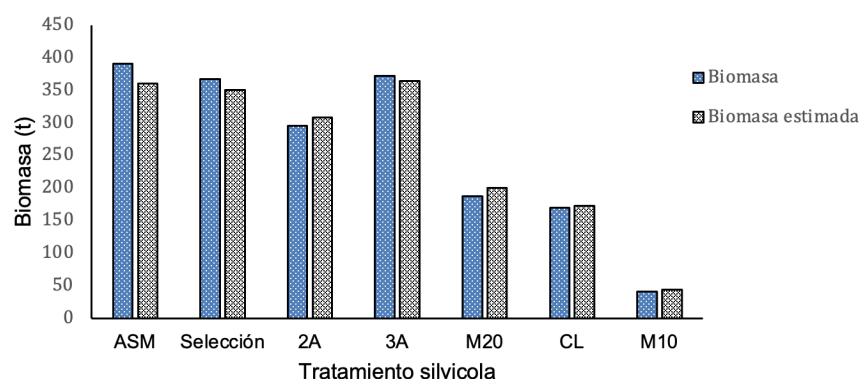


Figura 2. Biomasa ($t\ ha^{-1}$) estimada con datos de campo vs. datos espectrales. 2A=segundo aclareo, 3A=tercer aclareo, ASM = área sin manejo, M10= matarrasa 10 años, M20= matarrasa 20 años, CL =corta de liberación.

Figure 2. Biomass ($t\ ha^{-1}$) estimated from field data vs. spectral data. 2A = second thinning, 3A = third thinning, ASM = unmanaged area, M10 = 10-year clearcutting, M20 = 20-year clearcutting, CL = release cut.

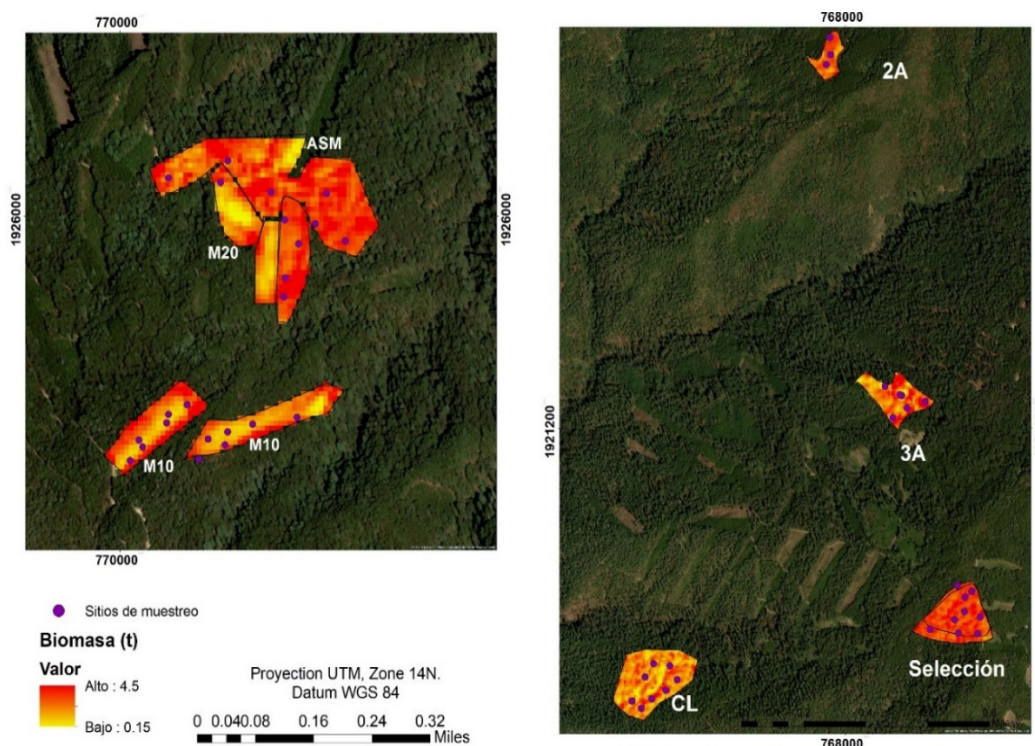


Figura 3. Estimaciones biomasa arbórea ($t\ pixel^{-1}$) en áreas bajo diferentes tratamientos silvícolas. M10: matarrasa (10 años), M20: matarrasa (20 años), 2A: segundo aclareo, 3A: tercer aclareo, CL: corta de liberación, ASM: área sin manejo.

Figure 3. Tree biomass estimates ($t\ pixel^{-1}$) in areas under different silvicultural treatments. M10: clearcutting (10 years), M20: clearcutting (20 years), 2A: second thinning, 3A: third thinning, CL: release felling, ASM: unmanaged area.

En la Figura 3 se observa la expansión de biomasa en las áreas bajo matarrasa, estas presentan de 44 a 200 t B ha⁻¹; el ASM presentó 360.4 t B ha⁻¹ y las áreas bajo aclareos (2A y 3A) presentaron valores promedios de 336.1 t B ha⁻¹; todos estos montos similares a los estimados con datos de campo (Figura 2). De acuerdo a lo anterior utilizar imágenes satelitales es una herramienta eficiente para validar información de campo, además de poder realizar una expansión a gran escala y ahorrar tiempo y costos (Dou & Yang, 2018; Vashum & Jayakumar, 2012).

CONCLUSIÓN

Los tratamientos silvícolas (TS) aplicados modifican la biomasa arbórea (B). Determinar dicha B es el primer paso para conocer los montos de carbono en un ecosistema y tener información viable para la gestión forestal y el mercado voluntario de carbono.

En respuesta a la biomasa acumulada, en este estudio los TS evaluados se clasifican en dos grupos, a) no intensivos: selección (367.3 t B ha⁻¹), segundo aclareo (295.7 t B ha⁻¹) y tercer aclareo (372.6 t B ha⁻¹); y los intensivos: M10 (40.4 t B ha⁻¹), M20 (187.7 t B ha⁻¹), y CL (169.2 t B ha⁻¹). Validar los montos de biomasa con teledetección, a través del índice de vegetación de diferencia normalizada, brinda información más viable y precisa, para lograr reducir costos y tiempo a gran escala. Además de poder clasificar nuevas áreas de aprovechamiento y llevar un monitoreo preciso antes y después el ciclo de corta.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salado, C. A., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Valdez-Lazalde, J. R., Miranda-Aragón, L., & Aguirre-Salado, A. I. (2012). Construction of aboveground biomass models with remote sensing technology in the intertropical zone in Mexico. *Journal of Geographical Sciences*, 22(4), 669–680. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0955-9>
- Ambrosio-Lazo, A., Rodríguez-Ortiz, G., Santiago-García, W., Ruiz Luna, J., Velasco-Velasco, V. A., & Enríquez-del Valle, J. R. (2024). Biomasa aérea y carbono en el suelo en rodales de pino-encino bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques*, 30(2), e3022564. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3022564>
- Amiri M, Pourghasemi HR. 2022. Mapping the NDVI and monitoring of its changes using google earth engine and sentinel-2 images. In: Pourghasemi HR, ed. *Computers in earth and environmental sciences*. Shiraz, Iran: Shiraz University. 127-136

- Chávez-Aguilar, G., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Suárez, M., López-López, M. Á., García-Moya, E., & 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>
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & Gómez-Cárdenas, M. (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera Bosques*, 23(3), 147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>
- Cortés-Pérez, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. (2021). Aboveground carbon storage in a temperate forest: high and low intensity forest management. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742440. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Dou, X., & Yang, Y. (2018). Estimating forest carbon fluxes using four different data-driven techniques based on long-term eddy covariance measurements: Model comparison and evaluation. *Science of the Total Environment*, 627, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.202>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Lujckx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., & Barbero, L. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- García-Aguilar, J. Á., Rodríguez-Ortiz, G., & Martínez-de la Cruz, J. (2015). Influencia de variables fisiográficas en la productividad de biomasa aérea en bosques mixtos. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(2), 87–98. <https://doi.org/20079559>
- Guevara Fisher, Y. Y., Cruz Cobos, F., Hernandez, F. J., Nájera Luna, J. A., Cruz Garcia, F., & Quiñonez Barraza, G. (2020). Efecto de la corta de matarrasa en la diversidad de la regeneración arbórea en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.709>
- Guzmán-Santiago, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., & Marroquín-Morales, 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>
- Institute SAS. (2017). Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures.
- Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2018). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la sierra madre oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 50–61. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i17.420>
- Köhl, M., Lasco, R., Cifuentes, M., Jonsson, Ö., Korhonen, K. T., Mundhenk, P., Navar, J. de J., & Stinson, G. (2015). Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management*, 352, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.036>
- Leyva-Pablo, T., de León-González, F., Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Mendoza-Ponce Alejandro, & Fuentes-Ponce, M. H. (2021).



- Carbon storage in forests with community forest management. *Madera y Bosques*, 27(4), e2742421. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742421>
- Mendoza-Ponce, A., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497–506. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq032>
- Muhe, S., & Argaw, M. (2022). Estimation of above-ground biomass in tropical afro-montane forest using Sentinel-2 derived indices. *Environmental Systems Research*, 11(5). <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00250-y>
- Reserva de Acción Climática. (2023a). Mecanismos de mercado de carbono. Disponible en: <https://www.climateactionreserve.org/es/how/voluntary-offset-program/>
- Rodríguez-Ortíz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., De Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719–732.
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. Á., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matorral. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez, M. H. (2010). Dendrometría. *Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF*, 312 p. <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometría.pdf>
- Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable Forest Management in Mexico. In *Current Forestry Reports*. 2(2), 93–105. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0033-0>
- Vaghela, B., Chirakkal, S., Putrevu, D., & Solanki, H. (2021). Modelling above ground biomass of Indian mangrove forest using dual-pol SAR data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100457>
- Vashum, K. T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests - a review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 02(04). <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000116>

