

Modelación de la biomasa aérea en bosques templados subtropicales secos en el noreste de México

Modeling of aerial biomass in dry subtropical temperate forests in northeastern Mexico

Angelina Bautista Cruz ^a, Rigoberto González Cubas ^b, Eduardo Javier Treviño Garza ^{**}, José Israel Yerena Yamalle ^a, Eduardo Alanís Rodríguez ^a, Oscar Alberto Aguirre Calderón ^a

*Autor de correspondencia: ^a Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, carretera nacional km 145, s/n Linares, CP 67700, Nuevo León, México, eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

^b Instituto Tecnológico Superior de San Miguel el Grande, Tecnológico Nacional de México, México.

SUMMARY

Information regarding biomass and wood volume of trees are two important factors that allow for analysis of the sustainability of forests. The objective of this study was to calculate the aerial biomass, amount of carbon and timber volume of dry subtropical temperate forests containing *Pinus pseudostrabus* Lindl. in northeastern Mexico. Field data corresponding to 57 sampling sites were used, including 28 Permanent Forest Research Sites and 29 conglomerates from the National Forest and Soil Inventory, from which biomass, carbon and volume were calculated using allometric equations. The spectral data (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) were derived from a Landsat 8 image taken in the year 2020. Using the results of the linear relationship between biomass-carbon and NDVI, a positive correlation ($P = 0.007$) was found using Spectral data from Landsat images for biomass increase and carbon sequestration in coniferous forests in the state of Nuevo León. The research contributes to the understanding of the dynamics of carbon and biomass for the improvement of sustainable development.

Keywords: volume, carbon, allometric equations, NDVI, species abundance.

RESUMEN

La información sobre la biomasa y el volumen de madera de árboles son dos factores importantes que permiten determinar la sustentabilidad de los bosques. El objetivo fue calcular la biomasa aérea, cantidad de carbono y el volumen maderable de bosques templados subtropicales secos con la presencia de *Pinus pseudostrabus* Lindl. en el noreste de México. Para definir este proceso se utilizaron datos de campo que correspondieron a 57 sitios de muestreo de los cuales 28 son sitios permanentes de investigación forestal y 29 conglomerados del inventario nacional forestal y de suelo, a partir de los cuales se calculó la biomasa, carbono y volumen mediante el uso de ecuaciones alométricas. Los datos espectrales (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI) se derivaron de una imagen Landsat 8 del año 2020. Mediante los resultados de la relación lineal entre la biomasa-carbono y el NDVI se obtuvo una correlación positiva ($P = 0,007$) con los datos espectrales de las imágenes Landsat para el incremento de biomasa y captura de carbono en los bosques de coníferas del estado de Nuevo León. La investigación contribuye entender la dinámica del carbono y la biomasa con la finalidad de adoptar proyectos en pro de la sustentabilidad.

Palabras clave: volumen, carbono, ecuaciones alométricas, NDVI, abundancia de especies.

INTRODUCCIÓN

La distribución de las especies en el planeta está determinada por factores como la heterogeneidad ambiental, la historia evolutiva, las relaciones de las especies, la dinámica de dispersión y los patrones espaciales de las perturbaciones ambientales naturales y provocadas por el hombre. Esta diversidad de especies que conforman los ecosistemas cumple una función importante en el ciclo del carbono en la atmósfera, mediante la fotosíntesis lo capturan y lo almacenan convirtiéndolo en biomasa, de la misma mane-

ra son parte fundamental en la regulación del ciclo de nutrientes, del ciclo del agua y otros servicios ecosistémicos (Sayre *et al.* 2020). Se estima que el 30 % de la superficie terrestre son bosques; durante el periodo de 2010 - 2020 la pérdida neta de superficie forestal a nivel mundial fue de 4,7 millones de hectáreas al año, a causa de factores como el aprovechamiento excesivo de los recursos forestales y el cambio de uso de suelo (FAO y PNUMA 2020).

México enfrenta el reto de detener y revertir el deterioro ambiental para conservar la biodiversidad y los recursos naturales. Mantener las superficies con cobertura boscosa

es una de las alternativas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático. Anualmente las áreas forestales almacenan carbono al incrementar su biomasa, cuantificarla permite entender el funcionamiento y dinámica de los ecosistemas forestales (Chávez-Aguilar *et al.* 2016). La capacidad que tiene los bosques para almacenar carbono está determinada por la composición florística, la edad y la densidad de la masa arbolada (Fonseca-González 2017).

La modelación espacial de estas variables en bosques templados subtropicales permite tener nuevos elementos para la toma de decisiones a favor de la conservación y un desarrollo sustentable, los datos obtenidos pueden ser útiles para la estimación indirecta de la biomasa, carbono o volumen de madera de las zonas boscosas de otros países, información que debe ser complementada con datos de campo, con mediciones de las variables dasométricas utilizadas en ecuaciones de biomasa. Por lo que, el objetivo del presente estudio es calcular el volumen maderable, la biomasa aérea y la cantidad de carbono almacenado de bosques templados subtropicales secos con la presencia de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el noreste de México.

MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se realizó en los bosques templados de pino, encino, pino-encino y encino-pino de las Unidades de Manejo Forestal (UMAFOR) 19 - 01 y 19 - 02 en el sur del estado de Nuevo León México. Estos bosques se localizan dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, entre las coordenadas de 23° 42' y 25° 30' de latitud norte y los 96° 30' y 100° 48' de longitud oeste. El intervalo altitudinal varía de 1.000 hasta los 3.600 m s.n.m., la temperatura medio anual oscila entre 7 y 22 °C, y la precipitación media anual de 411 a 1.058 mm (Cervo-Robayo *et al.* 2014).

Datos de Landsat 8 y variables espectrales para modelar biomasa. Para la cuantificación de biomasa aérea de bosques de coníferas mixtas de *P. pseudostrobus*, se seleccionaron vegetación de Pino, Encino, Pino-Encino y Encino-Pino del sur del estado de Nuevo León, de acuerdo con la clasificación de la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250.000, Serie VI (continuo nacional) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México (INEGI 2016). Posteriormente se adquirieron tres escenas de imágenes satelitales Landsat 8 del año 2020 para cubrir toda el área objetivo (Path 27 / Row 43, Path 28 / Row 43 y Path 28 / Row 42), los cuales se obtuvieron del servicio geológico de EE. UU. (<https://www.usgs.gov/>). Para evitar el efecto de la nubosidad y el efecto estacional sobre la vegetación en el procesamiento de las imágenes, el NDVI se obtuvo en promedio utilizando el conjunto de datos global de Google Earth Engine (Gorelick *et al.* 2017).

Para el análisis de la biomasa se empleó la técnica estandarizada del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Este índice describió la dinámica de la estructura de la vegetación, examinando el vigor, crecimiento, salud y la biomasa de la vegetación. El NDVI se obtuvo empleando los valores espectrales correspondientes a la región de la luz visible roja (R) (0,6 - 0,7 µm) y la luz infrarrojo-cercana (IRC) (0,7 - 1,3 µm):

$$NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R} \quad [1]$$

La clasificación de los valores del NDVI son para la nubosidad y agua valores menores a 0,01; para un suelo sin vegetación de un rango de entre 0,01 - 0,2; para una vegetación ligera (pastizales) entre 0,1 - 0,3; para una vegetación mediana entre 0,3 - 0,5; para vegetación en desarrollo entre 0,5 - 0,8; y de 0,8 a 1, para vegetación sana, vigorosa y densa (López-Pérez *et al.* 2015).

Diseño de muestreo y datos de inventario de campo. Los datos del inventario de campo provienen de 57 sitios de muestreo, de los cuales 28 son Sitios Permanentes de Investigación Forestal (SPIF) de 2.500 m², y 29 conglomerados del Inventario Nacional Forestal y de Suelo (INFyS) de 1.600 m², distribuidos homogéneamente en el área bajo estudio. Los SPIF se establecieron originalmente en el año 2014 y remedidos en 2018, para formar un sistema de monitoreo forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León México. Los conglomerados del INFyS se establecieron entre 2016 y 2017 como parte del Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal en México de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Se registró información para las especies arbóreas mayores de 7,5 cm de diámetro; las variables dasométricas fueron: especie, número de árboles, diámetro normal (DN), altura total (HT) y diámetro de copa (DC); todos los análisis se extrapolaron a unidad de superficie por ha⁻¹.

Volumen individual. Para cada una de las especies a partir de sus variables DN y HT, se determinó su volumen mediante la ecuación de Modelo de la Variable Combinada, utilizada en el Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Nuevo León 2014 (CONAFOR 2014), la cual se utiliza para estimar el volumen de las principales especies arbóreas en la Sierra Madre Oriental (cuadro 1).

Biomasa aérea. Para la cuantificación de la biomasa a nivel de especie se utilizaron las ecuaciones alométricas desarrolladas por diferentes autores (cuadro 2). Sin embargo, cuando la especie no contó con alguna ecuación para estimar biomasa, se empleó la siguiente ecuación general (9) sugerida por (Chave *et al.* 2014).

$$B = 0,0673*(DM*DN^2*H)^{0,976} \quad [9]$$

Donde B es biomasa en Kg, DM densidad de la madera en g cm^3 , DN es diámetro normal en cm y H es la altura en m. La densidad específica de la madera fue a nivel de especie reportada en la base de datos globales de densidad de la madera (Zanne *et al.* 2009).

Contenido de carbono. Se estimó mediante un factor de conversión de biomasa (B) a carbono (C) en los fustes de las especies, considerando que el contenido de carbono promedio para *Pinus* es del 50 % y *Quercus* spp. 48 %

(Yerena-Yamallel *et al.* 2012). Este factor representa la concentración de carbono promedio para coníferas y hojosas de acuerdo con las directrices del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero (IPCC 2006).

Modelo de regresión lineal simple. Para examinar la relación entre la Biomasa-Carbono y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (ρ), así como un análisis visual de los gráficos de dispersión de la relación de va-

Cuadro 1. Ecuaciones para estimar volumen rollo total a nivel especie para el estado de Nuevo León.

Equations to estimate total roundwood volume at the species level for the state of Nuevo León.

Especie	Ecuación	
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. & Cham. <i>Abies vejarii</i> Martínez	$V = \exp(-9,87472826 + 1,87766305 \cdot \ln(\text{DN}) + 1,00933229 \cdot \ln(\text{H}))$	[2]
<i>Alnus oblongifolia</i> Torr. <i>Arbutus arizonica</i> (A Gray) Sarg. <i>Arbutus glandulosa</i> M Martens & Galeotti <i>Arbutus xalapensis</i> Kunth. <i>Juniperus deppeana</i> Steud. <i>Juniperus monosperma</i> (Engelm.) Sarg. <i>Populus mexicana</i> Wesm. ex DC. <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco <i>Quercus acutifolia</i> Née <i>Quercus affinis</i> Scheidw. <i>Quercus canbyi</i> Trel. <i>Quercus crassifolia</i> Bonpl. <i>Quercus durifolia</i> Seemen <i>Quercus filiformis</i> CH Mull. <i>Quercus fusiformis</i> Small <i>Quercus glaucoides</i> M Martens & Galeotti <i>Quercus greggii</i> Trel. <i>Quercus laeta</i> Liebm <i>Quercus laurina</i> Bonpl. <i>Quercus mexicana</i> Humb. & Bonpl. <i>Quercus obtusata</i> Bonpl. <i>Quercus oleoides</i> Schltld. & Cham. <i>Quercus polymorpha</i> Schltld. & Cham. <i>Quercus pungens</i> Liebm. <i>Quercus rubescens</i> Trel. <i>Quercus rugosa</i> Née <i>Quercus rysophylla</i> Weath. <i>Quercus sebifera</i> Trel. <i>Quercus vaseyana</i> Buckley <i>Quercus virginiana</i> Mill.	$V = \exp(-9,82944377 + 1,9060093 \cdot \ln(\text{DN}) + 1,04047533 \cdot \ln(\text{H}))$	[3]
<i>Juglans mollis</i> Engelm. ex Hemsl.	$V = \exp(-9,48686252 + 1,82408096 \cdot \ln(\text{DN}) + 0,96892639 \cdot \ln(\text{H}))$	[4]
<i>Pinus arizonica</i> Engelm.	$V = \exp(-9,55262477 + 1,79669337 \cdot \ln(\text{DN}) + 1,12955055 \cdot \ln(\text{H}))$	[5]
<i>Pinus ayacahuite</i> C Ehrenb. ex Schltld. <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. <i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	$V = \exp(-9,4786656 + 1,77975727 \cdot \ln(\text{DN}) + 1,07182675 \cdot \ln(\text{H}))$	[6]
<i>Pinus cembroides</i> Zucc	$V = \exp(-9,8207876 + 1,89180185 \cdot \ln(\text{DN}) + 1,08048365 \cdot \ln(\text{H}))$	[7]
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltld.	$V = \exp(-8,72641434 + 1,43032994 \cdot \ln(\text{DN}) + 1,19541675 \cdot \ln(\text{H}))$	[8]

V: volumen (m^3), ln; logaritmo natural, DN; diámetro normal (cm), H; altura total (m).

Cuadro 2. Ecuaciones para estimar la biomasa para diferentes especies de coníferas y hojosas en bosques del Sur de Nuevo León.
 Equations to estimate biomass for different species of conifers and leafy trees in the forests of southern Nuevo León.

Especie	Ecuación	Autor
<i>Abies religiosa</i>	$B = (0,0173) * (DN^{2,7459})$	[10] Flores-Nieves <i>et al.</i> 2011
<i>Pinus arizonica</i>	$B = (Exp (-3,573) * (DN^{2,746}))$	[11] Návar-Cháidez 2010
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B = (Exp (-3,066) * (DN^{2,646}))$	[12] Návar-Cháidez 2010
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$B = (0,35179) * (DN^2)$	[13] Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez 2011
<i>Pinus teocote</i>	$B = (0,40196) * (DN^2)$	[14] Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez 2011
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$B = (0,1354) * (DN^{2,3033})$	[15] Návar 2009
<i>Quercus canbyi</i>	$B = (Exp (-2,3112) * (DN^{2,4497}))$	[16] Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> 2007
<i>Quercus rugosa</i>	$B = (0,0890) * (DN^{2,5226})$	[17] Návar 2009
<i>Quercus spp.</i>	$B = (0,45534) * (DN^2)$	[18] Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez 2011
<i>Pinus spp.</i> , <i>Abies spp.</i>	$B = (0,1229) * (DN^{2,3964})$	[19] Návar-Cháidez 2010

donde: B = biomasa total aérea (kg), DN = diámetro normal (cm); H = altura total (m).

riables contra las variables espectrales. Las variables espectrales del NDVI se correlacionaron significativamente con la biomasa y carbono ($P < 0,05$). Los diagramas de dispersión de biomasa y carbono contra los valores espectrales del NDVI fueron mejor descritos por un modelo de regresión lineal simple (20).

$$Y = B_0 + B_1X + \epsilon \quad [20]$$

Donde Y es la variable dependiente (Biomasa o Carbono), X la variable espectral independiente del NDVI. Los coeficientes B_0 y B_1 representan el intercepto y la pendiente de la parte fija del modelo. Estadísticamente se utilizó el 70 % de los sitios para el ajuste del modelo y el 30 % fue para su validación.

Para evaluar la calidad de ajuste se calcularon tres estadísticos de bondad de ajuste: el coeficiente de determinación ajustado (R_{adj}^2), donde es deseable que los valores obtenidos se aproximen a 1, la raíz del error medio cuadrático (REMC) cuyo valor es mejor cuando tiende a cero.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad [21]$$

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left[\frac{n-1}{n-p-1} \right] \quad [22]$$

$$REMC (m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}} \quad [23]$$

Posteriormente se aplicó el modelo lineal a las tres imágenes compuestas NDVI que cubren el área de estudio para construir un mapa de biomasa y carbono con una resolución de 30 m. Finalmente se construyó un mapa de estimación de existencias de biomasa y carbono local en 12 tipos de vegetación asociados con la distribución de *P. pseudostrobus* para el estado de Nuevo León.

RESULTADOS

La superficie total bajo estudio fue de 502 hectáreas, de los cuales: 36 % corresponde a bosque de pino-encino (BPQ), 20 % bosque de pino (BP), 15 % vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (VSa / BP), 14 % bosque de encino (BQ), 11 % bosque de encino-pino (BQP), 2 % vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino (VSa / BPQ) y el 2 % restante lo conforman la vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (VSa / BQ), vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino (VSa / BQP), vegetación secundaria arbustiva de bosque de ayarín (VSa / BS), bosque de ayarín (BS), vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel (VSa / BA) y vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (VSA / BP) (figura 1), elaboración propia basada en la carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250.000, Serie VI (continuo nacional) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México.

Las estadísticas descriptivas en los 57 sitios de muestreo mostraron que las variables de; volumen varió en un rango mínimo de 23 m³ ha⁻¹ hasta un máximo de 325 m³ ha⁻¹; mientras que la biomasa aérea fue de 44 Mg ha⁻¹ a 195 Mg ha⁻¹ y el carbono aéreo osciló entre 38 Mg ha⁻¹ y 114 Mg ha⁻¹ (cuadro 3).

Volumen. La zona boscosa presentó un volumen promedio de 177,19 m³ ha⁻¹, sin embargo, el volumen por tipo de ve-

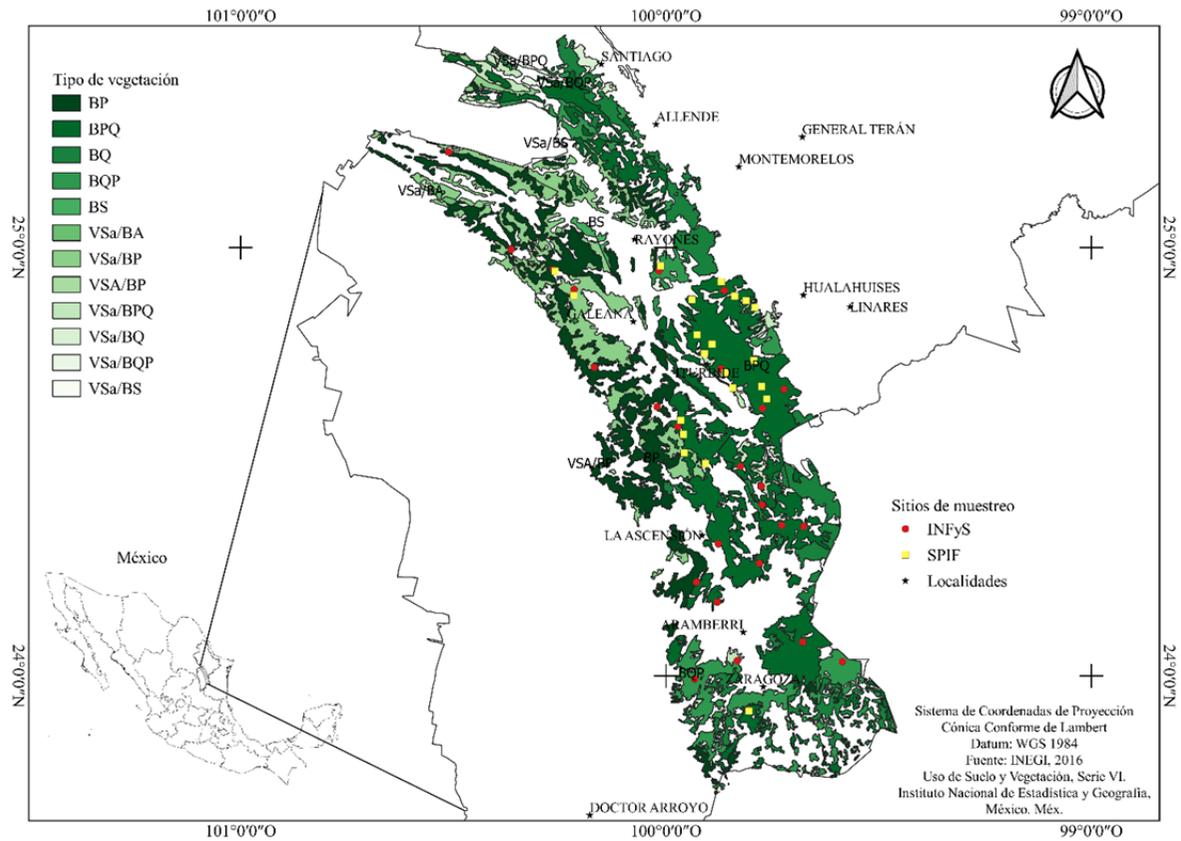


Figura 1. Tipos de vegetación y puntos de localización de los sitios de muestreo.
 Types of vegetation and sampling site locations.

Cuadro 3. Resumen estadístico de volumen, biomasa aérea y carbono vivo total.
 Statistical summary of volume, aboveground biomass and total living carbon.

Variable	Mínimo	Media	Desv. Est	Máximo
Volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	23,81	112,7	73,47	325,36
Biomasa aérea (Mg ha^{-1})	44,91	88,79	34,54	195,68
Carbono aéreo (Mg ha^{-1})	38,95	60,89	17,27	114,34

getación mostró que para el bosque de pino fue de $60,47 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ y para el bosque de pino-encino de $133,82 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ en contraste con el bosque de encino que presenta un volumen de $32,96 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ y el bosque de encino-pino con un volumen es de $86,35 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$. La tres primeras especies de mayor volumen de madera fueron *P. pseudostrobus* con $46 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (33 %), seguida por *Q. polymorpha* con $19 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (26 %) y *Q. laeta* con $11 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ (21 %) (figura 2).

Relación NDVI vs Biomasa. La correlación de Pearson (ρ) entre la variable espectral del NDVI y la biomasa fue significativa ($P = 0,007$). Por lo tanto, este índice es una variable independiente útil en el modelo. El gráfico de

dispersión del NDVI con respecto a la biomasa, mostró una tendencia lineal observada (figura 3). Los criterios de bondad de ajustes R^2_{adj} y REMC mostraron valores muy similares y deseables para cada uno de los modelos (cuadro 4).

Relación NDVI vs Carbono. La relación carbono y el NDVI tuvieron una correlación positiva con los datos espectrales de las imágenes Landsat para la acumulación de biomasa y carbono en los bosques de coníferas del estado de Nuevo León, por lo tanto, estos resultados podrán utilizarse para promover diversos proyectos encaminados a la gestión sustentable de los recursos naturales de la región.

Biomasa y carbono. La densidad de biomasa viva total media estimada para el área de estudio fue de 89,6 Mg ha⁻¹. Se utilizó el mapa de carbono, desarrollado en base al modelo de la Biomasa, para estimar el carbono almacenado por tipo de vegetación y visualizar el patrón de distribución de carbono entre 12 tipos de vegetación asociadas con *P. pseudostrobus* para el año 2020 (figura 4), el carbono medio varió considerablemente entre los 12 con un rango

de 8 a 77 Mg ha⁻¹. Las vegetaciones secundarias del mapa presentaron densidades de carbono menores a 42 Mg ha⁻¹ (VSA / BA; VSA / BP; VSA / BP). En contraste, bosques puros de encino-pino y pino-encino tienen densidades de carbono de 60 - 77 Mg ha⁻¹. La estimación de carbono en las áreas de asentamiento y las tierras de cultivo presentaron las tasas más bajas, y las áreas de color verde oscuro que representan bosques puros presentan valores más altos.

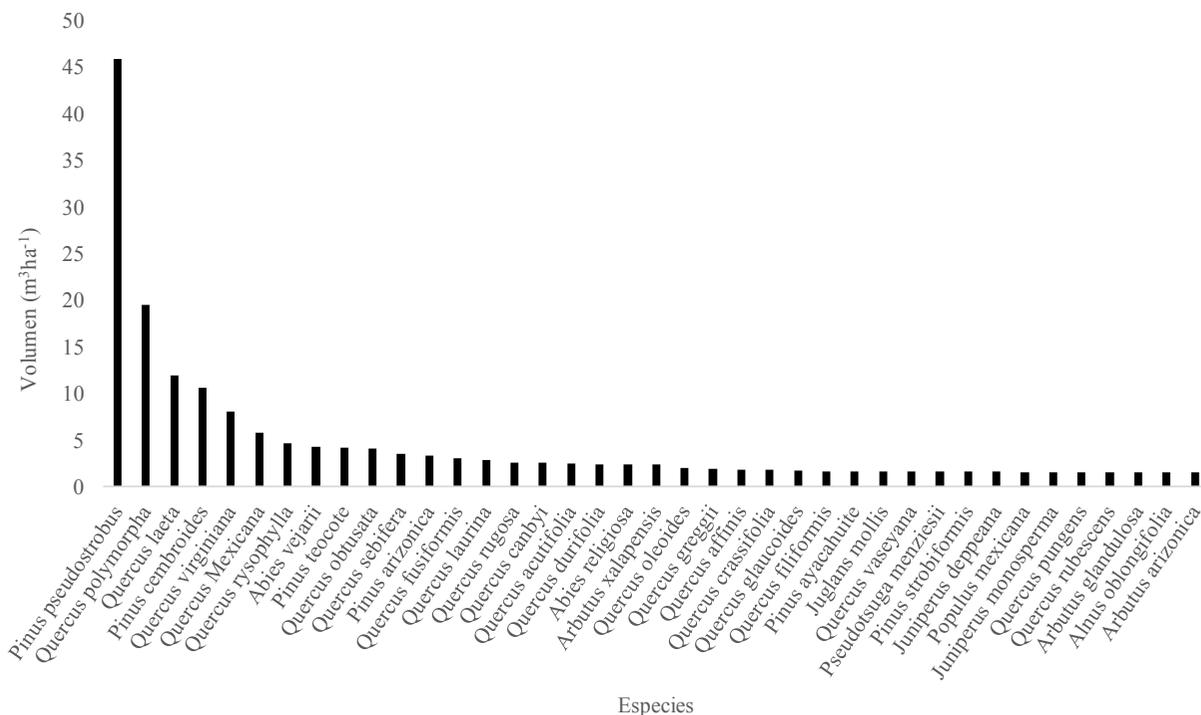


Figura 2. Distribución del volumen por hectárea de cada especie en el sur de Nuevo León, México.
 Distribution of volume per hectare of each species in southern Nuevo León, Mexico.

Cuadro 4. Parámetros estimados del modelo de regresión lineal para la biomasa y el carbono ($P < 0,01$) con NDVI como variable independiente.

Estimated parameters of the linear regression model for biomass and carbon ($P < 0.01$) with NDVI as the independent variable.

	<i>P</i>	EP	EE	Valor t	Aprox Pr > t	Bondad de ajuste			Mod
						REMC	R ² _{adj}	Loglik	
Biomasa	<i>b</i> ₀	-55,31	51,88	-1,06	< 0,01**	31,49	0,15	-223,97	1
	<i>b</i> ₁	205,35	73,62	2,78	< 0,01**				
Carbono	<i>b</i> ₀	-27,66	25,94	-1,06	< 0,01**	15,74	0,15	-192,08	2
	<i>b</i> ₁	102,67	36,81	2,78	< 0,01**				

donde: P = parámetros, EP = estimadores de los parámetros, EE = error estándar, Pr > |t| = nivel de significancia para los parámetros estimados, ** = Significativo, REMC = raíz del error medio cuadrático, R²_{adj} = coeficiente de determinación ajustado, Loglik = logaritmos de logaritmos de verosimilitud, Mod = modelo.

DISCUSIÓN

Volumen. El volumen estimado es alto en comparación con los $115 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de volumen registrado por Návar-Cháidez (2010) para los bosques templados del estado de Nuevo León, México, pero es menor el volumen estimado por Graciano-Ávila *et al.* (2019) para el bosque templado-frío de Durango, México donde el volumen es de $207,36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Según Návar-Cháidez y González-Elizondo (2009), la productividad o incremento en volumen aumenta con el índice de mezcla de pinos y encinos y por el aumento en la densidad.

La relación NDVI comparado con la Biomasa en un estudio difiere considerablemente, por ejemplo, en bosques templados del estado de Durango se encontró una correlación lineal múltiple significativa ($R^2 = 0,62$) entre NDVI y biomasa y el carbono (Martínez-Barrón *et al.* 2016), en comparación con otros estudios realizados mediante imágenes satelitales de mediana resolución en bosques de coníferas y latifoliadas presentaron una $R^2 > 0,90$ ajustada (Liu *et al.* 2017, Reyes-Cárdenas *et al.* 2019). La variabilidad en la estimación de biomasa suele depender de las condiciones del terreno (topografía, altitud, pendiente, precipitación y temperatura), como lo indican (Olthoff *et al.* 2016).

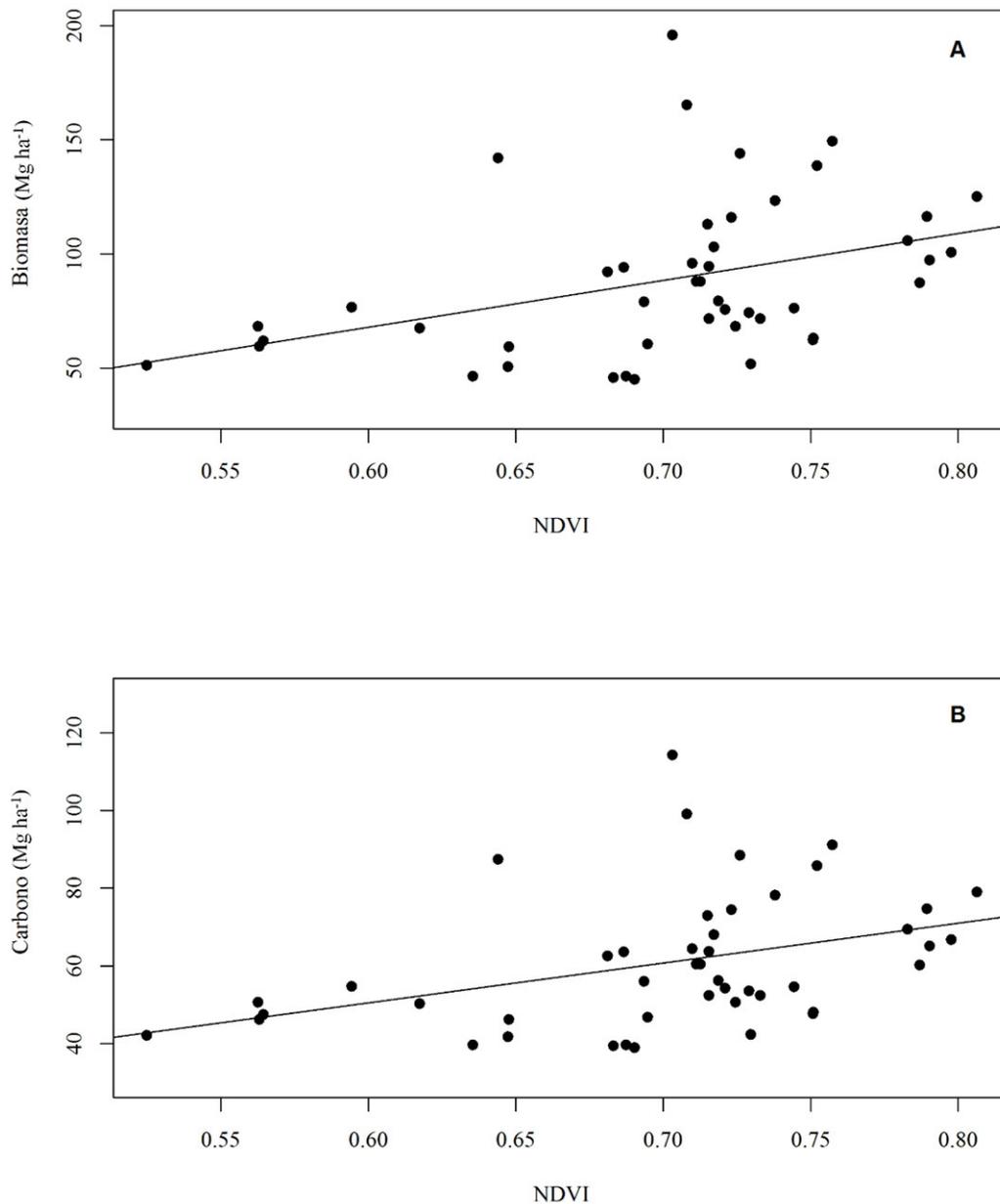


Figura 3. Gráficos de dispersión de la biomasa aérea (A) y carbono aéreo (B) (Mg ha^{-1}) contra el NDVI, $n = 57$.

Scatter plots of aboveground biomass (A) and aboveground carbon (B) (Mg ha^{-1}) against NDVI, $n = 57$.

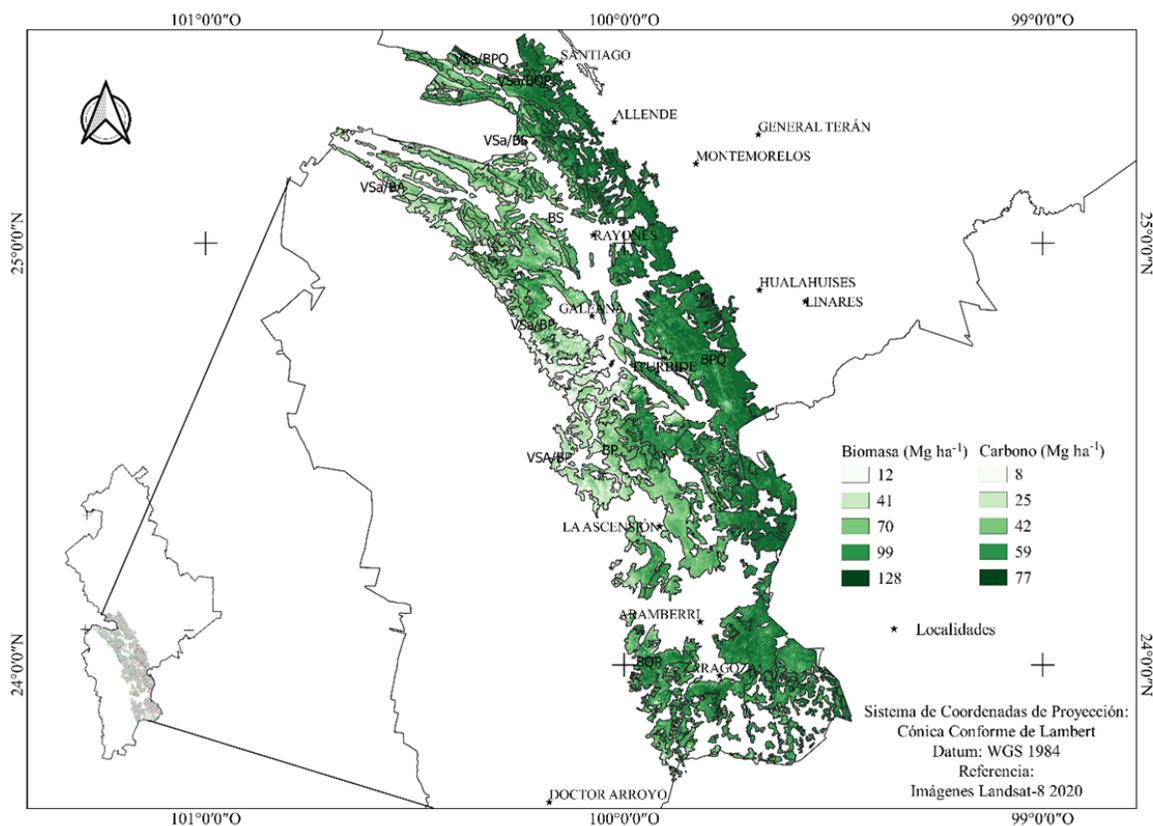


Figura 4. Mapa de densidad de biomasa y carbono vivo en los tipos de vegetación estudiados en el sur de Nuevo León, México.
 Map of biomass density and living carbon in the types of vegetation studied in southern Nuevo León, México.

Considerando la relación de la biomasa y el carbono. Los resultados obtenidos en este estudio son menores a los obtenidos por Domínguez-Cabrera *et al.* (2009) que estimaron que los valores de biomasa oscilan entre 13,34 - 99,24 Mg ha⁻¹ para bosques de encino-pino y el de pino-encino presentó un mínimo de 7,78 y un máximo de 79,11 Mg ha⁻¹ en el Sur de Nuevo León, sin embargo, son bajos en comparación con los obtenidos por (Graciano-Ávila *et al.* 2019) donde estimaron un promedio de 130,28 Mg ha⁻¹ de biomasa. En un estudio realizado por Návar (2009) encontró que el contenido de biomasa en la zona centro sur de la sierra Madre Occidental de Durango, México era de 130 Mg ha⁻¹, un valor alto en comparación con la densidad de biomasa obtenida en la presente investigación y la reportada por Návar-Cháidez (2010) para los bosques del estado de Nuevo León. La variación en los valores estimados del contenido de carbono para los 12 tipos de vegetación dependió en la composición de cada uno, la literatura reporta que el contenido de carbono en coníferas es más alto que en latifoliadas (Návar 2009).

CONCLUSIONES

El rango temporal del NDVI entre los 12 meses del año 2020 de las imágenes Landsat 8 proporcionó datos

adecuados para el monitoreo de la biomasa forestal y el carbono en los bosques asociados a *Pinus pseudostrabus*. Estos valores facilitaron el desarrollo de un modelo de regresión lineal simple que proporciona la base para mapear el carbono forestal y detectar su distribución espacial. Los resultados presentados aquí, es decir, el modelado y la estimación de biomasa ayudarán a estimar y detectar áreas con almacenamiento de carbono forestal bajo o alto.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por el financiamiento del trabajo de campo a través del proyecto CT1256-20 "Estimación del volumen y la biomasa aérea de comunidades boscosas en el centro-sur de Nuevo León" del Programa de Apoyo a la Investigación científica y tecnológica. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo de beca de posgrado al primer autor. A la Comisión Nacional Forestal por haber proporcionado información para la realización del presente análisis.

REFERENCIAS

Aguirre-Calderón OA, J Jiménez-Pérez. 2011. Evaluación de contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León.

- Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 74-84. DOI: <https://10.29298/rmcf.v2i6.575>
- Chave J, M Réjou-Méchain, A Búrquez, E Chidumayo, MS Colgan, WBC Delitti, A Duque, T Eid, PM Fearnside, RC Goodman, M Henry, A Martínez-Yrizar, WA Mugasha, HC Muller-Landau, M Mencuccini, BW Nelson, A Ngomanda, EM Nogueira, E Ortiz-Malavassi, R Pélissier, P Ploton, CM Ryan, JG Saldarriaga, G Vieilledent. 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology* 20(10): 3177-3190. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chávez-Aguilar G, G Ángeles-Pérez, MA Pérez-Suárez, E López, M García-Moya, C Wayson. 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.21829/myb.2016.2231454>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, MX). 2014. Inventario Estatal Forestal y de Suelos - Nuevo León 2014. Zapopan, Jalisco. 156 p.
- Cuervo-Robayo AP, O Téllez-Valdés, MA Gómez-Albores, CS Venegas-Barrera, J Manjarrez, E Martínez-Meyer. 2014. An update of high resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* 34(7): 2427-2437. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- Domínguez-Cabrera G, OA Aguirre-Calderón, J Jiménez-Pérez, R Rodríguez-Laguna, JA Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 15(1): 59-64.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT), PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, IT) 2020. El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Flores-Nieves P, MA López-López, G Ángeles-Pérez, MDL de la Isla-Serrano, G Calva-Vásquez. 2011. Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham: En proceso de declinación. *Revista mexicana de ciencias forestales* 2(8): 9-20.
- Fonseca-González W. 2017. Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales* 51: 91-109. DOI: <https://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.5>
- Gorelick N, M Hancher, M Dixon, S Ilyushchenko, D Thau, R Moore. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Graciano-Ávila G, E Alanís-Rodríguez, OA Aguirre-Calderón, MA González-Tagle, EJ Treviño-Garza, A Mora-Olivo, E Bueñía-Rodríguez. 2019. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista fitotecnica mexicana* 42(2): 119-127.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). 2016. Uso de suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional). Consultado 20 de sep. 2020. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/usv250s6gw.xml?_http-cache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html_xsl&_indent=no
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IT). 2006. Capítulo 4: Tierras forestales. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. 93 p.
- Liu K, J Wang, W Zeng, J Song. 2017. Comparison and evaluation of three methods for estimating forest above ground biomass using TM and GLAS data. *Remote Sensing* 9(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9040341>
- López-Pérez A, MR Martínez-Menes, DS Fernández-Reynoso. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua* 6(1): 121-137.
- Martínez-Barrón RA, OA Aguirre-Calderón, B Vargas-Larreta, J Jiménez-Pérez, EJ Treviño-Garza, JI Yamallel. 2016. Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales* 7(35): 91-105. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i35.77>
- Návar-Cháidez JJ, S González-Elizondo. 2009. Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica* 27: 71-87.
- Návar J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>
- Návar-Cháidez JJ. 2010. Los bosques templados del estado de Nuevo León: el manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques* 16: 51-69. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1611179>
- Olthoff AE, C Martínez-Ruiz, JG Alday. 2016. Patrones de distribución de especies arbustivas respecto a arbóreas a lo largo de un gradiente ambiental atlántico-mediterráneo: una aproximación a partir de datos del tercer Inventario Forestal Nacional. *Ecosistemas* 25(3): 22-34. DOI: <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.03>
- Reyes-Cárdenas O, EJ Treviño-Garza, J Jiménez-Pérez, OA Aguirre-Calderón, LG Cuéllar-Rodríguez, JG Flores-Garnica, A Cárdenas-Tristán. 2019. Modeling forest aboveground biomass using deterministic and stochastic techniques. *Madera y Bosques* 25(1): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511622>
- Rodríguez-Laguna R, J Jiménez-Pérez, O Aguirre-Calderón, E Jurado-Ybarra. 2007. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México* 32(101): 39-56.
- Sayre R, M Martin, D Karagulle, C Frye, S Breyer, D Wright, K Butler, K VanGraafeiland, T Boucher, J McGowan, J Touval, NH Wolff, L Sotomayor, ET Game, H Possingham. 2020. World Terrestrial Ecosystems. *Encyclopedia of the World's Biomes* 31-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12474-1>
- Yerena-Yamallel JI, J Jiménez-Pérez, OA Aguirre-Calderón, EJ Treviño-Garza, E Alanís-Rodríguez. 2012. Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista mexicana de ciencias forestales* 3(13): 49-56. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i13.488>
- Zanne AE, G López-González, DA Coomes, J Ilic, S Jansen, SL Lewis. 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. *Dryad Digital Repository*. DOI: <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

