

GRAVEDAD ESPECÍFICA, BIOMASA Y VOLUMEN DE ESPECIES ARBÓREAS PARA PROYECTOS DE CARBONO

SPECIFIC GRAVITY OF WOOD IN TREE SPECIES FOR CARBON PROJECTS

¹Yazmin Pérez-Alavez , ²Gerardo Rodríguez-Ortiz , ³Wenceslao Santiago-García ,
²Gisela Virginia Campos-Angeles , ⁴Meredith P. Martín , ²Salvador Lozano-Trejo 

^{1,2} Estudiante, investigador, Tecnológico Nacional de México, Campus Valle de Oaxaca (ITVO). División de Estudios de Posgrado e Investigación. Ex hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca, México. C.P. 71233. ³ Universidad de la Sierra Juárez, División de Estudios de Postgrado-Instituto de Estudios Ambientales, Ixtlán de Juárez Oaxaca, México. C. P. 68725. ⁴ Yale School of Forestry & Environmental Studies, 284 Graham Avenue, Brooklyn, NY, 11211, USA. ⁵Autor de correspondencia: (yazminprz720@gmail.com).

RESUMEN

Una de las preocupaciones mundiales que más ha destacado es la concentración del dióxido de carbono, afectando la atmosfera de la Tierra. Uno de los componentes importantes para conocer la calidad y dureza de la madera es la gravedad específica (*GE*, densidad básica de la madera), además es una propiedad hereditaria de gran importancia comercial, que se utiliza para estimar montos de carbono (C) en ecosistemas forestales. El objetivo del presente trabajo fue documentar información de la *GE*, biomasa y volumen de especies arbóreas y arbustivas para proyectos de secuestro de C. Se realizó una revisión bibliográfica en artículos científicos, de investigación y revistas de divulgación científica para conocer las diferentes ecuaciones alométricas que mayormente se utilizan para cuantificar la cantidad de biomasa, C y *GE* de diferentes especies del género pino, encino, arbustos y otras arbustivas. La *GE* se utiliza para estimar los montos de biomasa y C a partir del volumen maderable de las especies; esto es de gran utilidad en los proyectos de secuestro de C de comunidades forestales para que puedan incursionar en el Mercado Voluntario de Carbono. La Reserva de Acción Climática (CAR) utiliza la *GE* para poder realizar los cálculos correspondientes, siendo un factor importante en todo México para las diferentes especies existentes.

Palabras clave: biomasa, densidad básica, gases de efecto invernadero, modelos de volumen.

ABSTRACT

One of the most prominent global concerns is the concentration of carbon dioxide, the greenhouse gas that most affects the atmosphere of Earth. One of the most important components to know the quality and hardness of wood is the specific gravity (*SG*, basic density of wood), it is also a hereditary property of great commercial importance, which is used to estimate amounts of carbon (C) in forest ecosystems. The objective of this work was to document information on the *SG*, biomass and volume of tree and shrub species for C sequestration projects. A bibliographic review was carried out in different scientific and research articles, popular science magazines to know the different allometric equations that are most used to know the amount of biomass, carbon and *SG* of different species of the pine genus, oak, shrubs and some shrubs. The *SG* is used to estimate the amounts of biomass and C from the timber volume of the species, this is very useful in projects to sequester C from forest communities so that they can enter the Voluntary Carbon Market. The Climate Action Reserve (CAR) uses the *SG* to be able to carry out the corresponding calculations, being an important factor throughout Mexico for the different existing species.

Index words: biomass, basic density, greenhouse gases, volume models.

conservación y recuperación de los bosques (Ranero y Covaleda, 2018).

INTRODUCCIÓN

La concentración de gas de efecto invernadero (GEI) ha aumentado considerablemente, provocando la disminución de la materia orgánica, la humedad del suelo, temperatura, biomasa microbiana, calidad del suelo y cultivo (Chen et al., 2020; Haque et al., 2020; Li et al., 2020; IPCC, 2013; Usepa, 2013; Montzka et al., 2011); estos gases contribuyen al cambio climático atribuido directa o indirectamente a la actividad que el humano está provocando, lo cual altera la composición de la atmósfera global y al incremento de la temperatura atmosférica (Andrade-Castañeda et al., 2016; Torres et al., 2011; Concha et al., 2007). Una forma de mitigar los efectos que genera el CO₂ es capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa de las plantas y en el suelo (Mendoza-de Armas y Jiménez-Narváez, 2017; Saynes-Santillán et al., 2016; Torres et al., 2011).

En el 2013 comenzó en México el mercado voluntario de carbono (*MVC*), permitiendo a empresas convertir sus servicios y productos en carbono (C) neutral. Esto significa que la huella de C del producto o servicio ha sido compensada con la compra de bonos de C, neutralizando su impacto ambiental (Lucatello, 2012). El mercado de bonos de C es uno de los mecanismos que ha utilizado la economía ambiental para tratar de mitigar las emisiones de GEI a nivel mundial, cada bono de C representa una tonelada de CO₂ equivalente reducida o removida de la atmósfera (Doherty-Bigara y His, 2021). La denominación de bonos de C generalmente se utiliza para identificar las unidades de C que se transmiten a través de mercados voluntarios. Los bonos de C se generan cuando se realizan acciones para mitigar el cambio climático, es decir evitando una deforestación y permitiendo que el bosque siga con la cantidad de árboles en pie, generando ingresos para los productores e integrándolos a la

Los ecosistemas forestales conforman uno de los reservorios de C más importantes a escala mundial, pues son importantes en la regulación del clima (Cortés-Pérez et al., 2021; Kurz et al., 2016), constituyen el almacén de C más importante porque son fuentes de mitigación y reducción de GEI, en particular de CO₂, tienen la capacidad tanto para emitir como secuestrar CO₂, un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático. El proceso de la fotosíntesis ayuda a absorber en los árboles el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan como C en su biomasa, (tronco, hojas, ramas, raíces y suelo) (Carvajal-Agudelo y Andrade, 2020; IPCC, 2013). En la vegetación forestal la mayor acumulación de biomasa y de C se encuentran en el estrato arbóreo y herbáceo; su almacenamiento y captura dependen del clima, la densidad, la humedad, la especie, y la calidad del sitio. Los principales componentes de la biomasa aérea del estrato arbóreo son el fuste, las ramas y el follaje (Ordóñez-Díaz et al., 2015).

Los ecosistemas forestales son de gran importancia ya que su vegetación y suelo intercambian el 80 % C con la atmósfera, gracias a este proceso almacenan cantidades de C en la biomasa de sus hojas, ramas, tallos y raíces, mientras liberan oxígeno hacia la atmósfera, actuando como sumideros de C (Casiano-Domínguez et al., 2018; Pardos, 2010). El C almacenado se encuentra en la biomasa de los árboles y corresponde a la materia orgánica producida en un bosque, destacándose cuatro tipos de biomasa: biomasa viva, biomasa subterránea, materia orgánica muerta y biomasa en el suelo (FAO, 2002). Por esta razón, se han implementado políticas gubernamentales y acuerdos internacionales que proporcionan mecanismo de flexibilidad; uno de ellos el proyecto llamado mecanismo de desarrollo limpio (Concha, Alegre y Pocomucha, 2007), como forma de compensar a los países que protegen sus bosques y aquellos que reducen las emisiones de GEI (Torres et al., 2011). El Protocolo Forestal para México

(PFM) de la Reserva de Acción Climática (CAR) ayuda a incrementar el conocimiento al sector forestal para secuestrar, almacenar y emitir CO₂, obteniendo beneficios positivos con los bosques, ante el cambio climático, facilitando el rol positivo que los bosques pueden tener ante el cambio climático.

El peso y la dureza son componentes importantes para la gravedad específica (*GE*) o densidad de la madera, está se define como la relación entre la masa y la unidad de volumen, depende de la cantidad y tipo de elementos celulares que constituyen a cada especie, pero también se ve influenciada por el grosor de la pared celular de dichos elementos (Návar, 2011; Přemyslovská et al., 2007; Chavé et al., 2005). Por otra parte, la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la madera como dureza, peso y resistencia al impacto y a la abrasión están directamente relacionadas con la *GE*; a su vez esta característica se asocia con las condiciones climáticas que prevalecen en la región donde los individuos crecen (Rodríguez et al., 2015).

En México el consumo de leña a nivel residencial ocupa el tercer lugar como energético (SENER, 2012; Chavé, 2002). El objetivo de la investigación fue documentar información de la gravedad específica, biomasa y volumen de especies arbóreas y arbustivas para proyectos de secuestro de C.

DESARROLLO

Gravedad específica de la madera

Uno de los componentes más importantes para conocer la calidad y dureza de la madera es la *GE* (densidad básica de la madera), además es una propiedad hereditaria de gran importancia comercial (De Lima-Costas et al., 2020). Los bosques conformados de pino-encino son los árboles más representativos y económicamente importantes de los ecosistemas templados de México y de todo el mundo, siendo estas las que forman la mayor parte forestal comercial del país,

de tal manera que en estos bosques se concentra la mayor cantidad de C por la gran cantidad de celulosa y hemicelulosas que estos generan (Martin et al., 2021; Uribe-Salas et al., 2019). Algunos factores que afectan la *GE* de la madera y la corteza son la ubicación geográfica de los árboles, el contenido de humedad, la especie, el diámetro a la altura del pecho (*DN*), la edad y la posición del tallo (Miles et al., 2009); la información en México de la densidad básica de la madera es escasa (Velázquez et al., 2004).

Una de las formas para determinar la gravedad específica propuesta por Smith (1954) y tomada por Vázquez-Cuecuecha et al (2015), es la siguiente; $Db = \frac{1}{\frac{Ps-Pa}{Pa} + \frac{1}{1.53}}$, en donde, *Db* = densidad básica de la madera (g cm⁻³), *Ps* = peso saturado (g), *Pa* = peso anhidro (g), 1.53 = constante de la densidad (peso específico) de la madera.

Por otro lado, Giraldo-Charria et al (2014) y Ruiz-Díaz et al (2014) utilizaron la formula $Db = \frac{ps (kg)}{v (m^3)}$, en donde: *ps* = peso seco de la muestra (kg), *v* = volumen (m³). Valencia-Manzo y Vargas-Hernández (1997) utilizaron tres diferentes métodos para calcular la densidad de la madera:

I. Método empírico que considera a las muestras como un cilindro perfecto y con los valores de longitud del diámetro interior de 5 mm se obtiene el volumen de cada sección de las muestras de madera. Se emplea $Vv = \pi D^2 \times \frac{L}{4}$ donde: *Vv* = volumen estimado del cilindro de madera (cm³) *D* = diámetro interior del cilindro del taladro Pressler (0.5 cm) *L* = largo de la muestra de madera (cm). Posterior a ello se debe calcular el peso anhidro (*Po*) de las muestras en una balanza analítica después de deshidratarse en una estufa a 105-110°C hasta alcanzar peso constante. Con los datos de peso anhidro (*Po*) y volumen verde (*Vv*) se obtiene el valor de densidad básica de la madera (*Db*): $Db = \frac{Po (g)}{Vv (cm^3)}$.

2. Método de desplazamiento de agua, colocando muestras en un recipiente con agua, por siete días hasta obtener su peso constante; el volumen por desplazamiento en agua se obtiene colocando un recipiente con agua sobre una balanza; enseguida se introduce cada muestra de madera sin tocar las paredes en el fondo del recipiente, de modo que se obtiene el peso del agua desplazada, mismo que corresponde al volumen de la muestra (Vv).

3. Método de máximo contenido de humedad (MCH), la fórmula para obtener la densidad de la madera con este método fue presentada por Smith (1954) y tomada por Valencia-Manzo y Vargas-Hernández (1997), es la siguiente: $Db = \frac{1}{\frac{Ps - Po}{Po} + \frac{1}{Dr}}$ Donde: Db = densidad básica de la madera ($g\ cm^{-3}$), Ps = peso de la muestra saturada

(g) Po = peso de la muestra anhidra (g) Dr = densidad de la pared celular seca (1.53).

La *GE* es una característica sumamente importante para la obtención de la biomasa ya que este es un factor clave en la misma, para su obtención solo se necesita su peso seco y su volumen fresco (Cutini, Chianucci y Manetti, 2013). Al utilizar una variable de fácil medición (dn) se obtiene el volumen utilizando las fórmulas de los sistemas biométricos para Oaxaca o utilizando algún otro modelo para la especie, posterior a ello se calcula la gravedad específica de la especie y el producto de ambos genera la biomasa por individuo; cabe mencionar que la gravedad específica, aunque las especies sean las mismas, cambian dependiendo del lugar en donde se encuentren, esto se debe al clima, altitud, y exposición (Tablas I, 2, 3).

Tabla I. Gravedad específica (*GE*) de la madera de diferentes especies del género *Pinus*.

Lugar	Especie	<i>GE</i> ($g\ cm^{-3}$)	Fuente
Durango	<i>P. arizonica</i> Engelm., 1878	0.500	De la Paz-Pérez y Olvera, 1981
México	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltdl., 1838	0.420	Fuentes, 1998;
Puebla	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltdl., 1838	0.352-0.389	Quiñones, 1974
Veracruz	<i>P. ayacahuite</i> C. Ehrenb. Ex Schltdl., 1838	0.368	Quiñones, 1974
México	<i>P. caribaea</i> Morelet, 185	0.340-0.680	Chudnoff, 1980
México	<i>P. cembroides</i> Zucc., 1832	0.560-0.650	Eguiluz, 1978
Nuevo León	<i>P. cembroides</i> Zucc., 1832	0.533	Wolf, 1985
México	<i>P. contorta</i> Douglas ex Loudon, 1838	0.360	Fuentes, 1998
Baja California	<i>P. contorta</i> Douglas ex Loudon, 1838	0.362	Romero et al., 1982
México	<i>P. coulteri</i> Lamb. Ex D. Don, 1838	0.420	Fuentes, 1998
México	<i>P. coulteri</i> Lamb. Ex D. Don, 1838	0.419	Sotomayor, 2014
Baja California	<i>P. coulteri</i> Lamb. Ex D. Don, 1838	0.416	Romero et al., 1982
Chiapas	<i>P. chiapensis</i> (Martínez) Andersen, 1964	0.524-0.639	Miranda, 2015
Guerrero	<i>P. chiapensis</i> (Martínez) Andersen, 1964	0.330	Camacho, 1988
Zacatecas	<i>P. chihuahuana</i> Engelm., 1848	0.540	Eguiluz, 1978
Zacatecas	<i>P. chihuahuana</i> Engelm., 1848	0.440	Camacho, 1988
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.500	Fuentes, 1998;
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.390-0.470	Wright, 1999
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.570-0.700	Salazar y Soihet, 2001
México	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.450	Zanne et al., 2010

Michoacán	<i>P. chiapensis</i> Lindl., 1839	0.430-0.450	Echenique-Manrique y Díaz, 1969
México	<i>P. douglasiana</i> Martínez, 1943	0.420	Fuentes, 1998
Michoacán	<i>P. douglasiana</i> Martínez, 1943	0.420-0.490	Echenique-Manrique y Díaz, 1969
Durango	<i>P. durangensis</i> Martínez, 1942	0.530	Silva-Arredondo y Návar-Chaidez, 2010
México	<i>P. edulis</i> Engelm., 1848	0.500	Zanne et al., 2010
Durango	<i>P. engelmannii</i> Carrière, 1854	0.511	Camacho, 1988
México	<i>P. flexilis</i> E. James, 1823	0.370	Zanne et al., 2010
Hidalgo	<i>P. greggii</i> Engelm. ex Parl., 1868	0.304-0.394	García, 2005
Nuevo León	<i>P. greggii</i> Engelm. ex Parl., 1868	0.443-0-509	López y Valencia-Manzo, 2001
México	<i>P. halepensis</i> Mill., 1768	0.460	Zanne et al., 2010
México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.410	Fuentes, 1998
México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.410-0.480	Zanne et al., 2010
México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.410	Sotomayor y Ramírez, 2013
Ciudad de México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.421	Quiñones, 1974
Ciudad de México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.460-0.490	Echenique-Manrique y Becerra, 1981
Estado de México	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.355	Quiñones, 1974
Puebla	<i>P. hartwegii</i> Lindl., 1839	0.411	Quiñones, 1974
Michoacán	<i>P. herrerae</i> Martínez, 1940	0.550	Camacho, 1988
México	<i>P. jeffreyi</i> Balf., 1853	0.380	Fuentes, 1998
México	<i>P. jeffreyi</i> Balf., 1853	0.380	Sotomayor y Ramírez, 2013
Baja California	<i>P. jeffreyi</i> Balf., 1853	0.381	Romero et al., 1982
México	<i>P. johannis</i> Rob. -Pass., 1978	0.350	Fuentes, 1998
México	<i>P. johannis</i> Rob. -Pass., 1978	0.350	Sotomayor y Ramírez, 2013
Baja California	<i>P. johannis</i> Rob. -Pass., 1978	0.350	Romero et al., 1982
México	<i>P. lawsonii</i> Roezl ex Gordon, 1862	0.470	Fuentes, 1998
Michoacán	<i>P. lawsonii</i> Roezl ex Gordon, 1862	0.470-0.510	Echenique-Manrique y Díaz, 1969
Michoacán	<i>P. lawsonii</i> Roezl ex Gordon, 1862	0.670	Camacho, 1988
México	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.440-0.460	Sotomayor y Ramírez, 2013
Estado de México	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.440	Quiñones, 1974
Michoacán	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.450	Quiñones, 1974
Puebla	<i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.419	Quiñones, 1974
Durango	<i>P. lumholtzii</i> B. L. Rob. y Fernald, 1895	0.690	Camacho, 1988
México	<i>P. maximinoi</i> H. E. Moore, 1966	0.430	Sotomayor y Ramírez, 2013
México	<i>P. monophylla</i> Torr. y Frém., 1845	0.560	Martínez, 1948
México	<i>P. montezumae</i> Lamb., 1832	0.420	Sotomayor y Ramírez, 2013
Veracruz	<i>P. montezumae</i> Lamb., 1832	0.420	Dávalos, Echenique-Manrique y Sánchez, 1978
México	<i>P. oocarpa</i> Schiede ex Schltdl., 1838	0.550	Chudnoff, 1980
México	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.400-0.500	Chudnoff, 1980
Hidalgo	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.487	Quiñones, 1974

Oaxaca	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.510	Martínez y Martínez-Pinillos, 1996;
Puebla	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.470	Quiñones, 1974
Veracruz	<i>P. patula</i> Schiede ex Schltdl. y Cham., 1831	0.470-0.480	Dávalos, Echenique-Manrique y Sánchez, 1978
México	<i>P. ponderosa</i> Lawson y C. Lawson, 1836	0.380	Fuentes, 1998
Baja California	<i>P. ponderosa</i> Lawson y C. Lawson, 1836	0.368-0.410	Quiñones, 1974
México	<i>P. pringlei</i> Shaw, 1905	0.471-0.500	Sotomayor y Ramírez, 2013
México	<i>P. pseudostrobus</i> Lindl., 1839	0.540	Fuentes, 1998;
México	<i>P. quadrifolia</i> Parl. ex Sudw., 1897	0.410	Fuentes, 1998
Baja California	<i>P. quadrifolia</i> Parl. ex Sudw., 1897	0.411	Romero et al., 1982
México	<i>P. radiata</i> D. Don, 1836	0.380	Echenique-Manrique y Robles, 1993
Michoacán	<i>P. rzedowskii</i> Madrigal y Caball. Del., 1969	0.520-0.740	Eguiluz, 1978
México	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.510	Fuentes, 1998;
Durango	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.570	Silva-Arredondo y Nívar-Chaidez, 2012
Oaxaca	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.490	Martínez y Martínez Pinillos, 1996;
Veracruz	<i>P. teocote</i> Schltdl. y Cham., 1830	0.460-0.470	Dávalos, Echenique-Manrique y Sánchez, 1978

Tabla 2. Gravedad específica (*GE*) de la madera de diferentes especies del género *Quercus*.

Lugar	Especie	<i>GE</i> (g cm ⁻³)	Fuente
Michoacán	<i>Q. candicans</i>	0.707	Herrera-Fernández et al., 2017
Michoacán	<i>Q. laurina</i> Humb. Y Bonpl	0.664	Herrera-Fernández et al., 2017
Michoacán	<i>Q. rugosa</i> Née	0.543	Herrera-Fernández et al., 2017
Durango, México	<i>Q. spp</i>	0.470	Silva-Arredondo y Nívar-Cháidez, 2012
Sierra de Álvarez, SLP, México	<i>Q. thinkami</i>	0.735	Bárcenas-Pazos et al., 2008
Sierra de Álvarez, SLP, México	<i>Q. sebifera</i>	0.678	Bárcenas-Pazos et al., 2008
Guadalajara	<i>Q. castanea</i> Née	0.790	Guzmán, 1992
El Salto, Durango.	<i>Q. laeta</i> Liemb	0.680	Nájera, 2005
Linares, Nuevo León, México	<i>Q. mexicana</i>	0.870	Martínez, 2012
Linares, Nuevo León, México	<i>Q. muehlenbergii</i>	1.130	Martínez, 2012

Tabla 3. Gravedad específica (GE) de la madera de otras especies.

Lugar	Especie	GE ($g\ cm^{-3}$)	Fuente
México	<i>Abies concolor</i> (Gordon y Glend.) Lindl. Ex Hildebr., 1861	0.360	Fuentes, 1998
Baja California	<i>Abies concolor</i> (Gordon y Glend.) Lindl. Ex Hildebr., 1861	0.360	Romero et al., 1982
Durango	<i>Abies durangensis</i> Martínez, 1942	0.390	Camacho, 1988
Michoacán	<i>Abies flinckii</i> Rushforth, 1989	0.400	Herrera, Gómez-Nava y Herrera, 1976
Ciudad de México	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. y Cham., 1830	0.350-0.380	Echenique-Manrique y Becerra, 1981
Estado de México	<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. y Cham., 1830	0.370	Camacho, 1988
México	<i>Acer negundo</i> L., 1753	0.416	Zanne et al., 2010
Michoacán	<i>Acer negundo</i> L., 1753	0.500	López, 1997
Michoacán	<i>Acer pseudoplatanus</i> L., 1753	0.508-0.510	Zanne et al., 2010
México	<i>Acer saccharum</i> Marshall, 1785	0.560	Zanne et al., 2010
México	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltdl.) Standl., 1923	0.410	Zanne et al., 2010
Jalisco	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltdl.) Standl., 1923	0.410	Barajas-Morales, 1987
Morelos	<i>Amphipterygium adstringens</i> (Schltdl.) Standl., 1923	0.390	Orduño, 1998
México	<i>Anacardium occidentale</i> L., 1753	0.410-0.500	Zanne et al., 2010
México	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.720	Tamarit-Urias, 1996
México	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.730-1.200	Zanne et al., 2010
México	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.961	Horne, 2013
Campeche	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.800	Huerta y Becerra, 1974
Chiapas	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.800	Torelli, 1994
Chiapas	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.610	Martínez y Martínez-Pinillos, 1996;
Jalisco	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	1.200	Barajas-Morales, 1987
Quintana Roo	<i>Astronium graveolens</i> Jacq., 1760	0.800	Torelli, 1994
México	<i>Calocedrus decurrens</i> (Torr.) Florin, 1956	0.360	Fuentes, 1998
México	<i>Calocedrus decurrens</i> (Torr.) Florin, 1956	0.400	Salazar y Soihet, 2001
Chiapas	<i>Comocladia mollissima</i> Kunth, 1824	1.100	Rodríguez, 1985;
México	<i>Comocladia mollissima</i> Kunth, 1824	0.790	Zanne et al., 2010
Jalisco	<i>Comocladia mollissima</i> Kunth, 1824	0.790	Barajas-Morales, 1987
Hidalgo	<i>Cupressus benthamii</i> Endl., 1847	0.390	Camacho, 1988
México	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill., 1768	0.430	Chudnoff, 1980
Estado de México	<i>Cupressus lusitanica</i> Mill., 1768	0.390	Herrera, Gómez-Nava y Herrera, 1976
México	<i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw., 184	0.400	Zanne et al., 2010
México	<i>Cupressus sempervirens</i> L., 1753	0.380-0.490	Zanne et al., 2010
México	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i> (A. Murray) Parl., 1864 [1865]	0.390-0.410	Zanne et al., 2010
Oaxaca	<i>Cyrtocarpa procera</i> Kunth, 1824	0.480	Abundiz, 1999
Puebla	<i>Cyrtocarpa procera</i> Kunth, 1824	0.480	Abundiz, 1999
Coahuila	<i>Dasyliirion cedrosanum</i> Trel., 1911	0.168-0.302	Ríos-Camey et al., 2018
México	<i>Euterpe precatoria</i> Mart., 1842	0.273-0.540	Zanne et al., 2010
Puebla	<i>Guadua aculeata</i> Rupr. Ex E. Fourn., 1886	0.590-0.660	Zaragoza, 2012

Veracruz	<i>Guadua amplexifolia</i> J. Presl, 1830	0.360-0.419-0.475	Ordóñez y Bárcenas-Pazos, 2014
México	<i>Iresine arbuscula</i> Uline y W. L. Bray, 1896	0.480	Zanne et al., 2010
Veracruz	<i>Iresine arbuscula</i> Uline y W. L. Bray, 1896	0.480	Barajas-Morales, 1987
México	<i>Juniperus deppeana</i> Steud., 1840	0.480	Zanne et al., 2010
México	<i>Juniperus 125láccida</i> Schltdl., 1838	0.557	Sotomayor, 2014
México	<i>Mangifera indica</i> L., 1753	0.480-0.680	Zanne et al., 2010
México	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.850	INIF, 1977
México	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.800	Tamarit-Urias, 1996
México	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.590-0.600	Zanne et al., 2010
Campeche	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.698	Richter et al., 2012
Chiapas	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.770	Torelli, 1994
Quintana Roo	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.770	Torelli, 1994
Quintana Roo	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.799	Bárcenas-Pazos et al., 2003
Quintana Roo	<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb., 1908	0.698	Richter et al., 2012
Durango	<i>Picea chihuahuana</i> Martínez, 1942	0.530	Camacho, 1988
México	<i>Picea engelmannii</i> Parry ex Engelm., 1863	0.330	Zanne et al., 2010
Ciudad de México	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco, 1949 ó <i>Thuja orientalis</i> L., 1753	0.502-0.532	Zanne et al., 2010
México	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco, 1950	0.400-0.453	Zanne et al., 2010
México	<i>Podocarpus guatemalensis</i> Standl., 1924	0.400	Zanne et al., 2010
México	<i>Podocarpus matudae</i> Lundell, 1937	0.700	Zanne et al., 2010
Puebla	<i>Podocarpus matudae</i> Lundell, 1937	0.510	Camacho, 1988
México	<i>Podocarpus oleifolius</i> D. Don ex Lamb., 1824	0.440-0.460	Zanne et al., 2010
Chiapas	<i>Taxodium mucronatum</i> Ten., 1853	0.464	Miranda, 2015
Estado de México	<i>Saurauia serrata</i> DC., 1822	0.500	Aguilar-Rodríguez, 1996;
México	<i>Saurauia yasicae</i> Loes., 1896	0.435	Zanne et al., 2010
Veracruz	<i>Saurauia yasicae</i> Loes., 1896	0.400-0.470	Barajas-Morales, 1987

Estimación de biomasa

La biomasa está constituida por los componentes leñosos (árboles en pie) y el sotobosque: pastos, hierbas, hojarasca, mantillo, necromasa y el suelo (INTECO, 2016; Herrera et al., 2001; Husch, 2001; Nadler et al., 2001; IPCC, 1996). Los bosques son una de las fuentes más importantes en la captura de C ya que absorben el 30 % de las emisiones de CO₂ en un año (Cutini et al., 2013; Pan et al., 2011; Schlegel, 2001;), cuando llevan un manejo adecuado fijan la mayor cantidad de CO₂, todo esto se encuentra en función de varios factores como la edad del rodal, altura total, calidad de sitio, composición de especies, densidad, condiciones climáticas, edáficas, topográficas y tratamiento silvícola (Graciano-Ávila et al., 2019; Fonseca-González, 2017;

Soriano-Luna et al., 2015; Návar, 2010; Avendaño et al., 2009; Antonio et al., 2007; Návar et al., 2005). La densidad arbórea es un indicador que permite caracterizar la acumulación de la biomasa en los ecosistemas forestales, ya que presentan gran cantidad de árboles y se conoce realmente la vegetación existente (Hernández et al., 2013).

Existen diferentes metodologías para la obtención de la captura de carbono, uno de ellos es el método directo o destructivo que es utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y consiste en recolectar la biomasa de todos los árboles en un área conocida, secarla y pesarla, además se miden componentes básicos de un árbol como diámetro a la altura del pecho (*DN*, cm), altura total (*AT*, m), diámetro de copa (*DC*, m) y

longitud de copa (LC , m) (Soriano-Luna et al., 2015; Ruíz- Díaz et al., 2014; Birdsey et al., 2013; Somogyi et al., 2006). Las ecuaciones alométricas de biomasa sirven para conocer la cantidad de biomasa por árbol con variables de fácil medición (Cuevas-Cruz et al., 2022).

Las ecuaciones se realizan a partir de análisis de regresión, donde se estudian las relaciones entre la masa de los árboles y sus datos dimensionales (Rügnitz, León y Porro, 2009).

Díaz-Lezcano y Heyn-Chaparro (2022) utilizaron las siguientes fórmulas para la obtención de la biomasa: $BF = (V \times Pe)/1000$, donde BF = biomasa del fuste ($t\ ha^{-1}$), V = volumen del fuste ($m^3\ ha^{-1}$) Pe = densidad aparente de la madera ($kg\ m^{-3}$); para la biomasa total (BT , $t\ ha^{-1}$) $BT = BF \times FEB$; BF = biomasa del fuste (t); FEB = factor de expansión de biomasa, se utiliza valor de 3.4 para todas las especies de árboles. Biomasa total (BT , $t\ ha^{-1}$) $BT = 0.069 \times (DN^2 \times AT)^{0.9932}$; DN = diámetro a la altura del pecho (1.30 m), AT = altura total (m).

Otro método es el indirecto, consiste en cubicar y calcular el volumen de las trozas con fórmulas dendrométricas; el volumen total del fuste se obtiene con el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera (Francis, 2000). El análisis dimensional o alometría consiste en el estudio del cambio de proporción de varias partes de un organismo (Acosta-Mireles et al., 2002; Brown, 2001). La fórmula más utilizada para este método es la de Brown (1997) y consultada por los siguientes autores: Díaz-Lezcano y Heyn-Chaparro (2022), Quiceno-Urbina et al. (2016), Díaz-Ruiz et al. (2014), Brown (2002), es la siguiente $B = VC \times D \times FEB$, donde: B = biomasa seca ($t\ ha^{-1}$) VC = volumen comercial ($m^3\ ha^{-1}$), D = promedio de densidad de la madera (verde y peso seco) ($t\ m^{-3}$), FEB = factor de expansión de biomasa (relación entre la biomasa sobre el suelo secada en horno de los árboles y el volumen comercial de la biomasa secada en horno), sin dimensión.

En ramas, hojas y raíces, Rodríguez-Ortiz et al. (2019) utilizaron el factor de conversión $B = \frac{(Pv)}{(Ps)} \times (Pt)$, donde: B = biomasa (kg), Ps = peso seco de la muestra (g), Pv = peso fresco de la muestra (g), Pt = peso total del componente/árbol (g), la biomasa total del árbol es la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste + corteza, ramas, follajes y raíces). En las tablas 4, 5 y 6 se encuentran algunos de los modelos más utilizados para el género *Pinus*, *Quercus*, *Abies religiosa* y otras hojosas.

Estimación del volumen maderable

El volumen existente de los bosques se encuentra disponible para el abastecimiento de madera, es también un indicador importante sobre el potencial económico del bosque (FAO, 2004; Husch, 2001), de ahí la importancia de cuantificar el contenido de volumen, biomasa y carbono en ecosistemas forestales. La forma de conocer el volumen de madera de un árbol en pie, rollo o madera aserrada es mediante la cubicación, es un procedimiento en el que se toman datos reales de las dimensiones de los árboles en pie (diámetro a la altura del pecho (cm), altura total (m), madera aserrada (ancho, largo y espesor), utilizando un instrumento de medida (flexómetro o clinómetro) (Revilla-Chávez et al., 2021).

Quiceno-Urbina et al. (2016), para calcular el volumen maderable en latifoliadas, utilizaron la siguiente fórmula $V = \frac{1}{4} (3.1416) \times DN^2 \times AT \times Ff$, donde V = volumen del fuste ($m^3\ ha^{-1}$), DN = diámetro a la altura del pecho (cm), AT = altura total (m), Ff = factor de forma (0.70 en latifoliadas y 0.47 en pino; se suman todos los volúmenes y se infiere a hectárea).

Tabla 4. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular biomasa en diferentes especies del género *Pinus*.

Especie	Modelo	R ² _{adj}	Parámetros	Autor	Lugar
<i>P. ayacahuite</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.96	$\beta_0 = -3.066$ $\beta_1 = 2.646$	Návar-Cháidez, 2010	Noroeste de México
<i>P. cooperi</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.91	$\beta_0 = 1.922$ $\beta_1 = 2.231$		
<i>P. durangensis</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.83	$\beta_0 = -2.108$ $\beta_1 = 2.375$		
<i>P. leiophylla</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.87	$\beta_0 = -3.549$ $\beta_1 = 2.787$		
<i>P. teocote</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.86	$\beta_0 = -3.182$ $\beta_1 = 2.702$		
<i>P. pseudostrobus</i> Lind	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.93	$\beta_0 = 0.1549$ $\beta_1 = 2.3572$	Hernández-Moreno et al., 2020	Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca San Juan
<i>P. chiapensis</i> (Mart.) Andresen	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1} \times (AT)^{\beta_2}$	0.95	$\beta_0 = 0.2362$ $\beta_1 = 1.9717$ $\beta_2 = 0.4810$	Chávez-Pascual et al., 2013	Tabaá de la Sierra Norte de Oaxaca
<i>P. pseudostrobus</i> Lind	$\text{Ln}(B) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(DN)$	0.98	$\beta_0 = -3.164$ $\beta_1 = 2.599$	Rodríguez-Laguna et al., 2007	Sierra Madre Occidental
<i>P. maximinoi</i> H. E. Moore	$B = \beta_0 + \beta_1 \times (DN^2 \times AT)$	0.99	$\beta_0 = 19.21$ $\beta_1 = 0.016$	Pimienta- de la torre et al., 2019	Las Margaritas Chiapas
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN^2 + (\beta_2 \times AT) + (\beta_3 \times DN^2 \times AT))$	0.99	$\beta_0 = -24.15$ $\beta_1 = 0.018$ $\beta_2 = 2.580$ $\beta_3 = 0.015$		
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN + (\beta_2 \times AT) + (\beta_3 \times DN^2 \times AT))$	0.99	$\beta_0 = -28.04$ $\beta_1 = 0.959$ $\beta_2 = 1.982$ $\beta_3 = 0.015$		
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN^2 \times AT + (\beta_2 \times AT) + \beta_3 \times DN \times AT^2)$	0.99	$\beta_0 = -18.37$ $\beta_1 = 0.015$ $\beta_2 = 2.393$ $\beta_3 = 0.0$		
	$B = \beta_0 + (\beta_1 \times DN + (\beta_2 \times DN \times AT) + \beta_3 \times DN^2 \times AT)$	0.99	$\beta_0 = -6.66$ $\beta_1 = 0.015$ $\beta_2 = 0.104$ $\beta_3 = 0.014$		
	$B = \beta_0 \ln(DN) - \beta_1$	0.88	$\beta_0 = 88.118$ $\beta_1 = 263.74$		
	$B = \beta_0(DN) - \beta_1$	0.90	$\beta_0 = 1.6093$ $\beta_1 = 13.534$		
	$B = \beta_0 e^{\beta_1(DN)}$	0.91	$\beta_0 = 21.431$ $\beta_1 = 0.022$		
	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.91	$\beta_0 = 0.6575$ $\beta_1 = 1.1794$		
	$B = \beta_0(DN^2) + \beta_1(DN) - \beta_2$	0.90	$\beta_0 = 0.0028$ $\beta_1 = 1.919$ $\beta_2 = 21.762$		

B = biomasa (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), EXP = exponencial, Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = parámetros de regresión.

Tabla 5. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular biomasa en diferentes especies del género *Quercus*.

Especie	Modelo	R ² _{adj}	Parámetros	Autor	Lugar
<i>Q. magnoliaefolia</i> Née	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.98	$\beta_0 = 0.0345$ $\beta_1 = 2.9334$	Gómez-Díaz et al., 2011	Sierra de Huautla, Morelos
<i>Q. laurina</i> Humb. Y Bonpl	$B = \text{Exp}[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]$	0.9914	$\beta_0 = 4.3375$ $\beta_1 = 1.0760$	Ruiz-Aquino et al., 2014	Ixtlán de Juárez, Oaxaca
<i>Q. crassifolia</i> Humb. y Bonpl	$B = \text{Exp}[-\beta_0 + \beta_1 \ln(DN^2 \times AT)]$	0.9825	$\beta_0 = 2.8664$ $\beta_0 = 0.927$		
<i>Q. rugosa</i> Née	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.92	$\beta_0 = 0.0342$ $\beta_0 = 2.759$	Aguilar et al., 2012	Centro de México
<i>Q. crassifolia</i> Humb. y Bonpl	$B = \beta_0(DN^2 \times AT)^{\beta_1}$	0.96	$\beta_0 = 0.283$ $\beta_0 = 0.807$	Ayala-López et al., 2001	Meseta central de Chiapas
<i>Q. sideroxyla</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0) \times DN^{\beta_1}$	0.91	$\beta_0 = -2.592$ $\beta_0 = 2.585$	Návar-Cháidez, 2010	Noroeste de México
<i>Q. obtusata</i>	$B = \beta_0 \times DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2}$	0.98	$\beta_0 = -2.592$ $\beta_0 = 2.585$	Rodríguez-Laguna et al., 2007	Sierra madre Occidental

B = biomasa (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), EXP = exponencial, Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, = parámetros de regresión.

Tabla 6. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular biomasa en otras especies.

Especie	Modelo	R ²	Parámetros	Autor	Lugar
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.960	$\beta_0 = 0.034$ $\beta_1 = 2.7169$	Hernández-Moreno et al., 2020	Ejido Chincua, Senguio, Michoacán
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B_{fuste} = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.928	$\beta_0 = 0.0173$ $\beta_1 = 2.7459$	Flores-Nieves et al., 2011	Cerro Tlálloc, Texcoco, Estado de México.
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B_{ramas} = \beta_0 e^{\beta_1(DN)}$	0.617	$\beta_0 = 1.5842$ $\beta_1 = 0.044$		Cerro Tlálloc, Texcoco, Estado de México.
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$B_{follaje} = \beta_0 e^{\beta_1(DN)}$	0.588	$\beta_0 = 0.841$ $\beta_1 = 0.039$	Flores-Nieves et al., 2011	Cerro Tlálloc, Texcoco, Estado de México.
<i>Gmelina arborea</i>	$B = \text{Exp}(\beta_0 + \beta_1 \times \log_{10}(DN^2))$	0.930	$\beta_0 = 0.641384$ $\beta_1 = 2.75382$	Fonseca-González et al., 2021	
<i>Alnus acuminata</i> Kunth	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.9515	$\beta_0 = 0.0012$ $\beta_1 = 1.7877$	Díaz-Ríos et al., 2016	San Pablo Ixayoc, Texcoco, México
<i>Alnus acuminata</i> (Kunth)	$B = \text{Exp}(\beta_0 + \beta_1 \times \ln(DN))$	0.9933	$\beta_0 = -2.62104$ $\beta_1 = -2.51036$	Fonseca et al., 2013	Costa Rica
<i>Cupressus lusitanica</i> Mill	$B = \text{Exp}(\beta_0 + \beta_1 \times \ln(DN))$	0.970	$\beta_0 = -8.72393$ $\beta_1 = 2.31663$	Fonseca-González et al., 2023	Costa Rica

<i>Clethra mexicana</i>	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.950	$\beta_0 = 0.4632$ $\beta_1 = 1.8168$	Acosta, Carrillo y Gómez, 2011	Sierra-Huasteca, Hidalgo.
<i>Alnus arguta</i> (Schltdl) Spach	$B = \beta_0(DN)^{\beta_1}$	0.970	$\beta_0 = 0.1649$ $\beta_1 = 2.2755$	Acosta, Carrillo y Gómez, 2011	Sierra-Huasteca, Hidalgo.

B = biomasa (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), EXP = exponencial, Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, = parámetros de regresión.

Díaz-Lezcano y Heyn-Chaparro (2022) utilizan $V = G \times Ff \times AT$ V = volumen del fuste (m^3), G = área basal (m^2), Ff = factor de forma de Hutchinson (0.775) (4) y AT = altura

de fuste (m). En México se han desarrollado modelos de volumen para las principales especies comerciales arbóreas (Tabla 7) principalmente de clima templado-frío, pero la información es escasa para especies vegetales de clima cálido-húmedo.

Tabla 7. Ecuaciones alométricas más utilizadas para calcular volumen en diferentes especies del género *Pinus*.

Especie	Modelo	R^2_{adj}	Parámetros	Autor	Lugar
<i>P. patula</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2) + \beta_2 \times AT + \beta_3(DN^2) \times AT$	0.98	$\beta_0 = 0.2775$ $\beta_1 = 0.1432$ $\beta_2 = 0.4391$ $\beta_3 = 2.8510$	Díaz-Franco et al., 2007	Tlaxcala
<i>P. montezumae</i> Lamb.	$V = e^{\beta_0} \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1}$	0.99	$\beta_0 = -0.772$ $\beta_1 = 1.0105$	Muñoz-Flores et al., 2012	Michoacán
<i>P. chiapensis</i> (Mart.) Andresen	$V = \beta_0(DN^2 \times AT)^{\beta_1}$		$\beta_0 = 0.000227$ $\beta_1 = 0.9105$	Chávez-Pascual et al., 2013	San Juan Tabaa de la Sierra Norte de Oaxaca
<i>P. pseudostrobus</i> Lindl.	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.97	$\beta_0 = 0.000264$ $\beta_1 = 2.0603$ $\beta_2 = 0.3521$	Vásquez-Fabián et al., 2017	Villa Sola de Vega, Oaxaca
<i>P. ayacahuite</i>	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.99	$\beta_0 = 0.00817$ $\beta_1 = 1.5928$ $\beta_2 = -0.4072$	Miguel-Martínez et al., 2016	Sierra Norte, Oaxaca
<i>P. ayacahuite</i>	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.99	$\beta_0 = 0.000024$ $\beta_1 = 1.6254$ $\beta_2 = 0.85500$	Rojas-García et al., 2015	
<i>P. teocote</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.98	$\beta_0 = 0.00064$ $\beta_1 = 2.145567$ $\beta_2 = 0.668856$	Vásquez-Fabián et al., 2017	Villa Sola de Vega, Oaxaca
<i>P. teocote</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	0.95	$\beta_0 = 0.00187$ $\beta_1 = 0.4936$	Contreras y Navar, 2002	Durango
<i>P. teocote</i> Schl et. Cham	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	0.95	$\beta_0 = 0.04679$ $\beta_1 = 0.4796$	Contreras y Navar, 2002	Durango
<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	0.99	$\beta_0 = 0.04191$ $\beta_1 = 0.00003$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla
<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0 + \beta_1(DN^2) + \beta_2 \times AT + \beta_3(DN^2 \times AT)$	0.98	$\beta_0 = -0.0345$ $\beta_1 = 0.000041$ $\beta_2 = 0.000328$ $\beta_3 = 0.000031$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla

<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.99	$\beta_0 = 0.00003$ $\beta_1 = 1.98050$ $\beta_2 = 0.96080$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla
<i>P. chiapensis</i>	$V = \beta_0(DN^2 \times AT)^{\beta_1}$	0.99	$\beta_0 = 0.000039$ $\beta_1 = 0.987700$	Melchor-Marroquín et al., 2010	Veracruz y Puebla
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. Et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.98	$\beta_0 = 0.00004$ $\beta_1 = 1.50678$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Guerrero
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN \times AT)^{\beta_1}$	0.96	$\beta_0 = 0.00003$ $\beta_1 = 1.55023$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Hidalgo
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. Et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.96	$\beta_0 = 0.00007$ $\beta_1 = 1.81731$ $\beta_2 = 0.96656$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Jalisco
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.96	$\beta_0 = 0.00007$ $\beta_1 = 1.79199$ $\beta_2 = 1.01380$	Guzmán-Santiago et al., 2020	México
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN \times AT)^{\beta_1}$	0.93	$\beta_0 = 0.00003$ $\beta_1 = 1.54884$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Michoacán
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham	$V = \beta_0(DN^{\beta_1} \times AT^{\beta_2})$	0.96	$\beta_0 = 0.00006$ $\beta_1 = 1.75637$ $\beta_2 = 1.06774$	Guzmán-Santiago et al., 2020	Puebla
<i>Swietenia macrophylla</i> King	$V = \beta_0 \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1} + e$	0.97	$\beta_0 = 0.000046$ $\beta_1 = 0.973468$ $e = 0.001$	Hernández-Ramos et al., 2018	Centro y sur de Quintana Roo
<i>Swietenia macrophylla</i> King	$V = \beta_0 \times DN^{\beta_1}(DN^2 \times AT^{\beta_2}) + e$	0.97	$\beta_0 = 0.000024$ $\beta_1 = 0.560998$ $\beta_2 = 0.744073$ $e = 0.001$	Hernández-Ramos et al., 2018	Centro y sur de Quintana Roo

V = volumen (m³), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m), Ln = logaritmo natural, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = parámetros de regresión.

Estimación de carbono aéreo

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (*MDL*) es un procedimiento contemplado en el Protocolo de Kyoto por el que países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de *GEI* y recibir a cambio certificados de reducción de emisiones aplicables a su propio compromiso de reducción (Mercado-García y Molina-Rodríguez, 2021; INECC, 2016). Los países dedicados a los proyectos se benefician reduciendo sus emisiones, generando bonos de carbono que se utilizan para cubrir sus compromisos ante el Protocolo, o bien, venderlos en el mercado abierto (Karakosta et al., 2009).

Ésta es la instancia, en la que países como México pueden participar en la reducción global de emisiones y ser parte del mercado de los bonos de carbono (Fronti y García-Fronti, 2013; UNFCC, 2011). Los proyectos de *MDL* aprobados producen reducciones certificadas de emisión (*CER*), pueden ser negociadas con instituciones, empresas, industrias o países que no están alcanzando sus propias metas de emisión de CO₂. Un *CER* representa una tonelada de carbono que deja de emitirse a la atmósfera, aunque su precio varía según el tipo de proyecto, el valor por unidad actualmente es aproximadamente de 13 euros o 6.5 dólares (Sendeco, 2011).

Por otro lado, el Protocolo Forestal para México (PFM) de la Reserva ayuda a incrementar la capacidad del sector forestal para secuestrar, almacenar y emitir CO₂, facilitando el buen manejo que los bosques pueden llegar a tener ante el cambio climático, lo cual permite que aquellos propietarios manejen sus bosques y sean compensados directamente, aumentando los acervos de carbono. Las empresas e instalaciones con calderas industriales y comerciales cuentan ahora con un modo eficiente, y flexible para generar créditos de carbono utilizados en el Mercado Voluntario de Carbono. Para determinar el C, se debe obtener la diferencia de C en biomasa y el suelo en un tiempo determinado y la diferencia es el C secuestrado (CAR, 2013).

COMENTARIOS FINALES

La densidad básica de la madera (*DB*) es una característica de alta heredabilidad en árboles y, al mismo tiempo, un indicador de la dureza, resistencia y contenido de celulosa y hemicelulosas; estos últimos son cadenas de carbohidratos donde se almacena con el tiempo el carbono estructural a través del proceso fotosintético y se reducen los niveles de CO₂ en el ambiente. Esta relación estrecha entre la *DB* de la madera y el contenido de carbohidratos permite inferir en los montos de C y otros nutrimentos contenidos en la biomasa maderable, solo con el conocimiento del volumen maderable y su *DB*. Una ventaja de esta metodología es que todos los proyectos de manejo maderable utilizan necesariamente el volumen para medir la productividad, por ello, las estimaciones de secuestro de C de un ecosistema pueden conocerse al tener disponibles los valores de *DB*. De esta manera, la utilidad de la presente revisión es tener acceso a la información para estimaciones de C, y facilitar que comunidades poseedoras de recursos forestales maderables entren al Mercado Voluntario de Carbono.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

(CONACYT) a través del número de becario 677525 con el tema de investigación de tesis doctoral.

REFERENCIAS

- Abundiz, B.L. A.M. (1999). *Anatomía de la madera en árboles y arbustos del matorral xerófilo de Tehuacán, Puebla*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F. México.
- Acosta, M., Carrillo F. y Gómez. R. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 529-543.
- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velásquez-Martínez A. y Etchevers-Barra, J.D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736.
- Aguilar-Hernández, L., García-Martínez, R., Gómez-Miraflor, A. y Martínez-Gómez, O. (2016). Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*). In: *IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Aguilar, R., Ghilardi, A., Vega, E., Skutsch, M. & Oyama, K. (2012). Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 36, 192–207.
- Aguilar-Rodríguez, S. (1996). *Descripción de la madera y anatomía ecológica de las especies arbóreas de un bosque mesófilo de México*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F., México.
- Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C.C. y Segura-Madrígal, M.A. (2016). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y Tecnología*

- Agropecuaria*, 18(1), 103-112. doi:10.21930/rcta.vol18_num1_art:561
- Antonio, N., Tomé, M., Tomé, J., Soares, P. & Fontes, L. (2007). Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 37, 895- 906. DOI:10.1139/x06-276
- 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, 233-238.
- Ayala-López, R.S., Bergsma-de Jong, B.H.J. y Ramírez-Maldonado, H. (2001). Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7, 153-157.
- Barajas-Morales, J. (1987). Wood specific gravity in species from two tropical forests in Mexico. *IAWA Bulletin*, 8(2), 143-148.
- Bárceñas-Pazos, G.M., Ríos-Villa, R., Aguirre-Rivera, J.R., Juárez, F.B.I. y Honorato, S.J.A. (2008). Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco de la Sierra de Álvarez, S.L.P., México. *Madera y Bosques*, 14(3), 81-94.
- Bárceñas-Pazos, G.M., Zárate, M.R.P., Ordóñez, C.V.R., Guerrero, B.A. y Honorato, S.J.A. (2003). Correlación de los resultados de impacto o tenacidad de 16 maderas mexicanas utilizando dos métodos de prueba. *Madera y Bosques*, 9(1), 55-70.
- Birdsey, R., Angeles, P.G., Kurz, W.A., Lister, A., Olguin, M., Pan, M., Wayson, C., Wilson, B. & Johnson, K. (2013). Approaches to Monitoring Changes in Carbon Stocks for REDD+. *Carbon Management*, 4, 519-537.
- Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In: *Congreso Forestal Mundial*. Antalya Turquía.
- Brown, S. (2001). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116, 363-372.
- Brown, S. (2002). Measuring carbon in forest: Current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), 363-372.
- Carvajal-Agudelo, B.N. y Andrade, H.J. (2020). Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso del suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 24(1), 13-22. <https://doi.org/10.22579/20112629.587>
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S. y Aryal, D.R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401894. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Camacho, U.D. (1988). *La madera estudio anatómico y catálogo de especies mexicanas*. Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). D. F., México.
- Concha, Y.J., Alegre, C.J. y Pocomucha, V. (2007). *Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de Theobroma cacao L. en el Departamento de San Martín Perú*. Tesis Profesional. Fac. Ecología Aplicada, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Contreras, J.C. y Návar, J. (2002). Ecuaciones aditivas para estimar componentes de volumen para *Pinus teocote* de Durango, México. *Ciencia Forestal en México*, 27, 67-82.
- Cortés-Pérez, M., León-González, F.D., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A. y Fuentes-Ponce, M. (2021). Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques*, 27(spe), e2742440. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Cuevas-Cruz, J.C., Aquino-Ramírez, M., Cruz-Kú, C. R., & Morales-Sosa, I.J. (2022). Ecuaciones alométricas aditivas para estimar biomasa aérea y concentración de carbono de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. *Madera y Bosques*, 28(3), e2832356. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2832356>

- Cutini, A., Chianucci, F. & Manetti, M.C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*P. pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest Biogeosciences and Forestry*, 6, 331-337. DOI: 10.3832/for0941-006
- Chavé, J. (2002). *Medición de densidad de madera en árboles tropicales*. Manual de campo. Pan-Amazonia. 7 p.
- Chavé, J., Andalo, C. S., Brown, M.A, Cairns, J.Q., Chambers, J.Q., Eamus, D., Fölster H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J.C., Enríquez-del Valle, J.R., Chávez-Servia, J.L. & Campos-Ángeles, G.V. (2013). Factores de expansión de biomasa aérea para *P. chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(spe6): 1273-1284.
- Chen, L., Chen, Z., Ja, G., Zhon, J., Zhao, J., & Zhang, Z. (2020). Influence of forest on soil freeze-thaw dynamics and greenhouse gas emissions through the regulation of snow regimes: A comparison study of the farmland and forest plantation. *Science of The Total Environment*, 726, 138-403. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138403
- Chudnoff, M. (1980). *Tropical timbers of the world*. U. S. Forest Service, United States Department of Agriculture (USDA). USA.
- Dávalos, S. R., Echenique-Manrique, R. y Sánchez, V.J. (1978). Características mecánicas de tres especies de pino del Cofre de Perote, Veracruz. *Biótica*, 3(1), 37-55.
- De Lima-Costas, E.S., Cavalcante-do Santos, R., Baptista-Vidaurre, G., Vinícius- Oliveira, C.R., Gonçalves-Rocha, M.S., Lorenzato-Carneiro, R. & Trugilho, F.P. (2020). The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 45(8), 117-807. doi:10.1016/j.foreco.2019.117807
- Díaz-Lezcano, M.I. y Heyn-Chaparro, J.M. (2022). Estimación del contenido de carbono en la cobertura forestal de un bosque secundario del distrito de Curuguaty, Paraguay. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 27(2), 55-71. <https://doi.org/10.32480/rscp.2022.27.2.55>
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E. y Etchevers-Barra, J.D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Díaz-Ríos, M.J., Vázquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M., Sánchez-Vélez, A., Lara- Bueno, A. y Cruz-León, C.A. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(spe16), 3235-3249.
- Doherty-Bigara, J. y His, S. (2021). *¿Son los mercados de carbono un mecanismo sólido para asegurar el éxito del Acuerdo de París?*. 23 de mayo de 2022, de Banco Interamericano de Desarrollo
- Eguiluz, P. T. (1978). *Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género Pinus en México*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México, México.
- Echenique-Manrique, R. y Becerra, M.J. (1981). *Algunas características fisicomecánicas de la madera de tres especies de la Cordillera Neovolcánica*. Nota Técnica. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2004). *Actualización de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales a 2005*. Términos y Definiciones (Versión Definitiva). Programa de

- Evaluación de los Recursos Forestales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 35 p.
- FAO. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://goo.gl/64uVDj>.
- 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, <http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.5>
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M. y Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(46). <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>
- Fonseca-González, W., Rojas-Vargas, M., Villalobos-Chacón, R. y Alice-Guier, F. (2023). Estimación de biomasa y carbono en árboles de *Cupressus lusitanica* Mill. en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(2), 1-17. <https://doi.org/10.15359/rca.57-2.6>
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M. y Spínola-Parallada, R.M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Ciencias Ambientales*, 143-159. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-1.7>.
- Flores-Nieves, P., López-López, M.M, Ángeles-Pérez, G., de la Isla-Serrano, M.L. & Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham: en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9-20.
- Francis, J. K. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science*, 36(3-4), 346-350.
- Fronti, L. y García-Fronti, I. (2013). Viabilidad y cuestiones contables de los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio en Argentina. *Visión de Futuro*, 17(1), 30-48.
- Fuentes, S. M. (1998). Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 41(1), 221-229.
- García, V. A. N. (2005). *Contribución de las propiedades físicas de la madera de Pinus greggii proveniente de dos plantaciones en Hidalgo*. Tesis de licenciatura, Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAP), Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Hidalgo, México.
- Giraldo-Charria, D. L., Nieto-Rodríguez, V.M., Sarmiento, M. y Borralho, N. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181-192.
- Gómez-Díaz, J.D., Etchevers-Barra, D.J., Monterrosos-Rivas, A.I., Campo-Alvez, J. y Tinoco-Rueda, J.A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Q. magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261-272. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O.A., González-Tagle, M.A., Treviño-Garza, E.J., Mora-Olivo, A. y Buendía-Rodríguez, E. (2019). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127.
- Guzmán-Santiago, J.C., Aguirre-Calderón, O.A., Jiménez-Pérez, J. y Vargas-Larreta, B. (2020). Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia Forestal*, 23(2), 99-113.
- Guzmán, H.L. (1992). *Las cactáceas de la Sierra de Manantlán, Jalisco*. Tesis de licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de Guadalajara (U de G). Jalisco, México.
- Haque, F., Santos, M.R. & Chiang, W.Y. (2020). CO₂ sequestration by wollastonite-amended agricultural soils-An Ontario field study.

- International Journal of Greenhouse Gas Control*, 97, 103017. DOI: 10.1016/j.ijggc.2020.103017.
- Hernández-Moreno, J.A., Velázquez-Martínez, A., Fierros-González, A.M., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V.J. y Vera-Castillo, J.A.G. (2020). Estimación de biomasa aérea y carbono, en rodales con y sin manejo forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Madera y Bosques*, 26(1), e2611802. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611802>
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Tamarit-Urías, J.C., Martínez-Ángel, L. y García-Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34-46.
- Hernández, R.J., García, M.J.J., Muñoz, F.H.J., García, C.X., Sáenz, R.T., Flores, L.C., Hernández, R.A. (2013). Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *P. teocote Schlecht.* et Cham. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 62-77. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i19.379>
- Herrera, A., del Valle J. y Alonso, S.O. (2001). Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. En *Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile. 18 p.
- Herrera-Fernández, A.C., Carrillo-Parra, A., Pedraza-Bucio, F.E., Correa-Méndez, F., Herrera-Bucio, R., López-Albarrán, P. y Rutiaqui Quiñones, J.G. (2018). Densidad, composición química y poder calorífico de la madera de tres especies de encinos (*Quercus candicans*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*). *Ciencia Nicolaita*, (72), 136-154. <https://doi.org/10.35830/cn.v0i72.345>
- Herrera, R.J.A., Gómez-Nava, M.S. y Herrera, B.A. (1976). *Durabilidad natural de la madera de especies forestales mexicanas*. Boletín Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México.
- Horne, J. (Coord.). (2013). A guide to lesser known tropical timber species. Global Forest & Trade Network (GFTN); World Wildlife Fund (WWF). Switzerland.
- Huerta, C.J. y Becerra, M.J. (1974). *Anatomía macroscópica y algunas características físicas de diecisiete maderas tropicales mexicanas*. Boletín divulgativo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México.
- Husch, B. (2001). Estimación del contenido de carbono de los bosques. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, 18-30 de octubre de 2001. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile, 87-92.
- INECC. (2016). El Mecanismo de Desarrollo Limpio. <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectpriv/cc/actoresdelprocesomdl>.
- INIF (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales). (1977). *Algunas características tecnológicas de maderas tropicales mexicanas*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF). México.
- INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). (2016). *Metodología para la cuantificación y reporte de remociones de gases de efecto invernadero producto de actividades forestales INTE/ DN03:2016*. San José, Costa Rica.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2013). *Cambio climático: bases físicas*. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change) (1996). *Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. México.
- Karakosta, Ch., Doukas, H. y Psarras, J. (2009). Directing clean development mechanism

- towards developing countries' sustainable development priorities. *Energy for Sustainable Development*, 13, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2009.04.001>
- Kurz, W.A., Birdsey, R., Mascorro, V., Greenberg, D., Dai, Z., Olguín, M. & Colditz, R. (2016). *Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal en América del Norte: herramientas para monitorear, registrar en informes y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en el sector forestal*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 24 p.
- Lucatello, S. (2012). Los mercados voluntarios de carbono en Norteamérica y su gobernanza: ¿qué reglas aplican para el comercio internacional de emisiones en la región? *Norteamérica*, 7(spe), 107-128.
- Li, Ch., Xiong, Y., Haung, Q., Xu, X. & Huang, G. (2020). Impact of irrigation on fertilization regimes on greenhouse emission from soil of mulehng cultivated maize (*Zea mays* L.) field in the upper reaches of Yellow River, China. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120873. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120873>
- López, L. M. y Valencia-Manzo, S. (2001). Variación de la densidad relativa de la madera de *Pinus greggii* Engelm. del norte de México. *Madera y Bosques*, 7(1), 37-46.
- Martin, M. P., Peters, C.M., Asbjornsen, H. & Ashton, M.S. (2021). Diversity and niche differentiation of a mixed pine–oak forest in the Sierra Norte, Oaxaca, Mexico. *Ecosphere*, 12(4), e03475. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3475>
- Martínez, R. J.J. (2012). *Propiedades físicas y mecánicas de la madera de las especies Quercus mexicana y Quercus muehlenbergii*. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Nuevo León, México.
- Martínez, C. J. L. y Martínez-Pinillos, C. E. (1996). Características de maquinado de 32 especies de madera. *Madera y Bosques*, 2(1), 45-61.
- Martínez, M. 1948. *Los pinos mexicanos*. Ediciones Botas. México.
- Melchor-Marroquín, J.I., Hernández, A., Acosta, M. y García, J.J. (2010). *Tabla de volumen para Pinus chiapensis*. INIFAP, México.
- Mendoza-de Armas, C. y Jiménez-Narváez, G. (2017). Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 70(2), 8120-8122.
- Mercado-García, A. y Molina-Rodríguez, C.B. (2021). América Central en el mercado de emisiones: una evaluación multicriterio de proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio. *Problemas del Desarrollo*, 52(204), 35-58. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.204.69648>
- Miguel-Martínez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J.R., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., y Santiago-García W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea para *P. ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1575-1584.
- Miles, P., Smith, D. & Brad, W. (2009). *Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America*. Res. Note NRS-38. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 35 p. <https://doi.org/10.2737/NRS-RN-38>
- Miranda, F. (2015). *La vegetación de Chiapas*. Tomo 2. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Chiapas, México.
- Montzka, S.A., Dlugokencky, E.J. & Butler & J.H. (2011). Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476, 43-50.
- Muñoz, F.J., Aguilar, M.R., Madrigal, S.H., García, J.M., Lara, M. y Madrigal, L.H. (2002). *Elaboración de una tabla de volúmenes de Pinus montezumae en la región oriente de Michoacán*. Ficha tecnológica. INIFAP-SAGARPA. Uruapan, Michoacán. 2 p
- Muñoz-Flores, H.J., García-Magaña, J., Orozco-Gutiérrez, G., Coria-Avalos, V.M. y Muñoz-Vega, Y.Y. (2012). Evaluación dasométrica de

- un área semillera de *Pinus montezumae* cordero. A 13 años de su establecimiento en el Municipio de Zacapu, Michoacán. *Foresta Veracruzana*, 14(2), 1-8.
- Nadler, C., Meza, A., Torres, R. y Jara, M.A. (2001). Medición del carbono almacenado en los bosques de la reserva nacional Malleco. IX Región, Chile. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile*.
- Nájera, L.J., Zacarías, V.A., González, M. J. y Luna, G. J. (2005). Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus laeta* Liemb. de El Salto, Durango. *Ra Ximhai*, 1(3), 559-576.
- Návar, J. (2011). *Probabilidad y estadística aplicadas al manejo de recursos naturales y medio ambiente*. McGraw Hill, México, D.F.
- Návar, J. (2010). Measurement and Assessment Methods of Forest Aboveground biomass: A Literature Review and the Challenges Ahead. In: *Biomass*. Maggy Ndombo Benteke Momba (Ed.). Agosto, 2010. Rijeka, Croatia. InTech. pp. 27-64
- Návar-Cháidez J.J. (2010). Biomass allometry for tree species of Northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12, 507-519.
- Návar C.J.J., González, N. & Graciano, J. (2005). Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 11, 15-34.
<http://dx.doi.org/10.21829/myb.2005.1121254>
- Oliva, M., Culqui, M., Leiva, L., Collazos, S., Salas, R., Vásquez, R., Héctor, V. y Quintana, J.L. (2017). Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de *Pinus patula* y herbáceas nativas. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149-157. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>
- Ordóñez, C. V. R. y Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (*Guadua aculeata*, *G. amplexifolia* y *G. velutina*). *Madera y Bosques*, 20(2), 111-125.
- Ordóñez-Díaz, J.A.B., Rivera-Vázquez, R., Tapia-Medina, M.E. y Ahedo-Hernández, L.R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7-16.
- Orduño, C. A. (1998). *Anatomía de la corteza de cuatro especies de la selva baja caducifolia del estado de Morelos: origen, desarrollo y regeneración*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados (COLPOS), Campus Montecillo. México, México.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. DOI: 10.1126/science.1201609.
- Pardos, J.A. (2010). Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Ciencia e Innovación*. Madrid, España. <https://goo.gl/FD9PUu>.
- Pimienta-de la Torre, D.deJ., Reyes-Reyes, J., Rodríguez-Morales, J. A. y Marroquín-Morales, P. (2019). Estimación de biomasa aérea total y contenido de carbono de *Pinus maximinoi* H. E. Moore en Las Margaritas, Chiapas, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 23(2), 31-41.
- Přemyslovská, E., Slezingerová, J., Rybníček, M., Gryc, V., Vavrčík, H. & Praus, L. (2007). Basic density of wood in different forest type. In: K. Přemyslovská, J. Škvřelina y M. Blaženek, eds. *Bioclimatology and natural hazards. International Scientific Conference, Poľanad Detvou. Slovakia*, 17-20.
- Quiceno-Urbina, N.J., Tangarife-Marín, G.M. y Álvarez-León, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-Chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna*

- Azul, 43, 171-202. DOI: 10.17151/luaz.2016.43.9.
- Quiñones, O.J. (1974). *Características físicas y mecánicas de la madera de 5 especies mexicanas*. Boletín Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna (SFF), Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). México
- Ranero, A. y Covaleda, S. (2018). El financiamiento de los proyectos de carbono forestal: Experiencias existentes y oportunidades en México. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401913.
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401913>
- Revilla-Chávez, J.M., Abanto-Rodríguez, C., Guerra-Arévalo, W.F., García-Soria, D., Guerra-Arévalo, H., Domínguez-Torrejón, G., & Gabriel da- Silva Carmo, I.L. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25-31.
<https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>
- Richter, H.G., Silva, G.J.A., Fuentes, T.F.J., Rodríguez, A.R. y Torres, A.P.A. (2012). *Industrialización, comercialización y manejo sostenible de diez especies nativas mexicanas*. Universidad de Guadalajara (U de G); Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); Comisión Nacional Forestal (CONAFOR); Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT). México.
- Ríos-Camey, J.M., López-López, B., Méndez, G.J., Ramírez, D.J.A. y Aguirre, C.Ó.A. (2018). Propiedades físicas y mecánicas de escapos florales de sotol (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.) en el sureste de Coahuila. *Agraria*, 15(2), 79-84.
- Rojas-García, F. y Villers-Ruiz, L. (2005). Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del Volcán La Malinche. *Madera y Bosques*, 11(1), 63-71.
<https://doi.org/10.21829/myb.2005.1111262>
- Rojas-García, F., De Jong, B.H.J. y Martínez-Zurimendi, P. (2015). Base de datos de 478 ecuaciones alométricas para estimar biomasa de árboles y bosques mexicanos. *Annals of Forest Science*, 72, 835-864.
<https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Rodríguez, C.R.M. (1985). *Descripción anatómica de 20 especies de maderas de la colección del Dr. Faustino Miranda*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). D. F., México.
- Rodríguez, A.R., Ramírez, A.M., Palacios, H.J., Fuentes, F.J.T., Silva, J.A.G. y Saucedo, A.R.C. (2015). Características anatómicas, físico-mecánicas y de maquinado de la madera de mezquite (*Prosopis velutina* Wooton). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(28), 156-173.
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J.Á., Leyva-López, J.C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J.R. y Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511713.
<https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Rodríguez-Ortiz, G., De los Santos-Posadas, H.M., González-Hernández, V.A., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A. y Fierros-González, A.M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 18(1), 25-41.
<https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811116>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. y Jurado-Ybarra, E. (2007). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N. L. *Ciencia Forestal en México*, 32, 39-56.
- Romero, A.C., de la Paz-Pérez, O.C. y Corral, L.G. (1982). *Características anatómicas y fisicomecánicas de ocho especies de coníferas de Baja California Norte*. Boletín Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales (INIF), Subsecretaría Forestal y de la Fauna

- (SFF), Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). México
- Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J.I., Manzano-Méndez, F., Rodríguez-Ortiz, G., Romero-Manzanares, A. y Fuentes-López, M.E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 20(2), 33-48. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202162>
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Leyva-López, J. C. y Enríquez-del Valle, J.R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales en México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28-45.
- Rügnitz, T.M., León, M.C. y Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales*. Manual técnico II, Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/ Consorcio Iniciativa Amazonica (IA). Lima, Perú.
- Salazar, R. y Soihet, C. (2001). *Manejo de semillas de 75 especies forestales de América Latina*. Volumen II. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica.
- Saynes-Santillán, V., Etchevers-Barra, J.D., Paz-Pellat, F. y Alvarado-Cárdenas, L.O. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.
- SENDECO. (2011). www.sendeco2.com
- SENER (Secretaría de Energía). (2012). *Prospección de energías renovables 2012-2026*. SENER, Gobierno Federal. México. 156 p.
- Silva-Arredondo, F. M. y Návar-Cháidez, J. J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(1), 77-88.
- Soriano-Luna, M.Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F.O. y Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423-438.
- Somogyi, Z., Cienciala, E., Mäkipää, R., Muukkonen, P., Lehtonen, A. & Weiss, P. (2006). Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *Eur. Journal of Forest Research*, 126, 197-207.
- Schlegel, B. (2001). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. In: *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. Valdivia, Chile.
- Smith, M.D. (1954). *Maximum moisture content method for determining specific gravity of small samples*. Forest Products Laboratory, Forest Service. U.S. Department of Agriculture. Report No. 2014. Madison WI. E.U.A. 8 p.
- Sotomayor, C.J.R. (2014). *Caracterización mecánica de la madera con métodos no destructivos*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). México, Michoacán.
- Sotomayor, C. J. R. y Ramírez, P. M. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 1-27.
- Tamarit-Urías, J.C. (1996). Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. *Madera y Bosques*, 2(2), 29-41.
- Torres, J., Espinoza, W., Reddiar, L. y Vázquez, A. (2011). Secuestro de carbono en potreros arbolados, potreros sin árboles y bosque caducifolio de Huatusco, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 543-549.
- Torelli, N. (1994). Characteristics and prospects for rational use (harvesting) of Mexican tropical forest. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 52(5), 337-341.
- Uribe-Salas, D., España-Boquera, M.L. y Torres-Miranda, A. (2019). Aspectos biogeográficos y ecológicos del género *Quercus* (Fagaceae) en Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*, (126), e1342. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1342>

- Usepa (U. S. Environmental Protection Agency). (2013). *Inventory of U. S. Greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2011*. Washington, dc, EE. UU.: [nscep] National Service Center for Environmental Publications.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention On Climate Change). (2011). *Protocolo de Kioto*. http://unfccc.int/portal_espanol/essential_background/Kioto_protocol/items/3329.php
- Vázquez-Cuecuecha, O.G., Zamora-Campos, E.M., García-Gallegos, E. y Ramírez-Flores, J.A. (2015). Densidad básica de la madera de dos pinos y su relación con propiedades edáficas. *Madera y Bosques*, 21(1), 129-138.
- Vásquez-Fabián, S.A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J.R., Campos-Angeles, G.V. y Santana-Flores, A. (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 164-172.
- Valencia-Manzo, S. y Vargas-Hernández, J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81-87.
- Velázquez, M., Ángeles, A.G., Llanderal, O.T., Román, A.R. y Reyes, V. (2004). *Monografía de Pinus patula*. Conafor, Colpos, Semarnat. México, D.F. 124 p.
- Wolf, F. (1985). Algunas propiedades de la madera de *Pinus cembroides* Zucc. Flores, L. J. E.; Cantú, A. C. M. & Marroquín, de la F. J. S. (Eds.). *Memorias Ier Simposium Nacional sobre pinos piñoneros*. Facultad de Silvicultura y Manejo de Recursos Renovables, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). México. pp. 69-82.
- Wright, J. A. (1999). *Utilización y calidad de los productos mejorados de Pinus patula en plantaciones manejadas sosteniblemente*. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México, México.
- Zanne, A.E., Westoby, M., Falster, D.S., Ackerly, D. D., Loarie, S.R. Arnold, S.E. Coomes & D.A. (2010). Angiosperm wood structure: global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *Am. Journal Botanic*, 97(2), 207215.
- Zaragoza, H. I. (2012). *Anatomía y propiedades físico-mecánicas de culmo de bambú (Guadua aculeata Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México.