

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ECUACIONES DE BIOMASA AÉREA Y VOLUMEN EN *Pinus halepensis* Mill., EN
LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA MÉXICO

Tesis

Que presenta JUAN CARLOS MONTOYA JIMÉNEZ

como requisito parcial para obtener el Grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2017

ECUACIONES DE BIOMASA AÉREA Y VOLUMEN EN *Pinus halepensis* Mill., EN
LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA MÉXICO

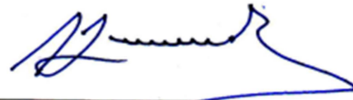
Tesis

Elaborada por JUAN CARLOS MONTOYA JIMÉNEZ como requisito parcial para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Jorge Méndez González

Asesor principal



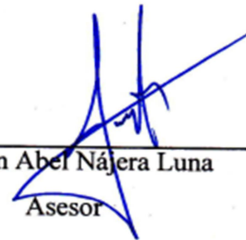
Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor



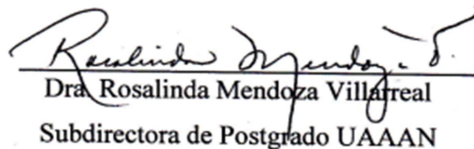
Dr. Javier De Jesús Cortés Bracho

Asesor



Dr. Juan Abel Nájera Luna

Asesor



Dra. Rosalinda Mendoza Villareal
Subdirectora de Postgrado UAAAN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme estar y llegar hasta esta etapa de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante los dos años de estudio de maestría.

A mi familia Asunción Montoya González, María Luisa Jiménez Avendaño, Luis Reynaldo Montoya Jiménez, Gustavo Adolfo Montoya Jiménez, en especial mis padres porque siempre me han apoyado con sus consejos, oraciones, amor, cariño y todas las motivaciones que a través de la vida me han transmitido.

A mi novia Cecilia Guadalupe Ruiz González la personita que durante muchos años me ha acompañado pero lo más importante siempre me ha ayudado y apoyado.

A todos mis amigos: Jorge Méndez González, Paulina Bazaldúa Sánchez, Thelma Catherine Méndez Bazaldúa y Sofía Jamileth Méndez Bazaldúa, Librado Sosa Díaz y su esposa Gladis Selene Ramírez Ruiz, Ernesto Octavio Sosa Díaz, Misael Sosa Díaz, Carlos Miguel Ruiz González, gracias por permitirme ser parte de momentos importantes en su vida y que ustedes lo fueran en la mía.

Al Dr. Jorge Méndez González por todos los conocimientos que me transfirió con su asesoría, gracias a él este trabajo se concluyó satisfactoriamente.

Al Dr. Mario García Aranda por toda la ayuda brindada durante todo el ciclo de la maestría

A Érika Gabriela Solís Berlanga por su amabilidad y apoyo en todos los procesos administrativos que se realizaron durante mi posgrado.

A los asesores: Dr. Alejandro Zermeño González, Javier de Jesús Cortés Bracho y Juan Abel Nájera Luna quienes contribuyeron a la realización y mejora del presente trabajo

A los estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal de la UAAAN, cursando la materia de epidometría 2015, quienes participaron en los trabajos de campo de este estudio.

DEDICATORIA

Asunción Montoya González

Con todo el amor del mundo te dedico un logro más en mi vida, gracias a ti se ha podido concluir siempre me has apoyado nunca me has dejado solo.

María Luisa Jiménez Avendaño.

Con todo el amor del mundo este resultado es también por ti madre así que te lo dedico, siempre has estado dando ese amor maternal que necesita una familia.

Luis Reynaldo y Gustavo Adolfo

Quiero que este objetivo que he cumplido satisfactoriamente sirva de ejemplo para que sigan superándose académicamente.

Cecilia Guadalupe Ruiz González

Para ti amorcito este es el resultado de un objetivo que nos fijamos hace dos años, como este espero concluir muchos más a tu lado.

Con cariño para Reynaldo Montoya Santis, Candelaria González Vázquez y María Elena Avendaño López.

Con mucho cariño para María Elena Montoya González, Dominga Montoya González, María Teresa Montoya González, José Alfredo Montoya González, Eva Velazco Bautista, Leonardo Daniel García Montoya.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
General	2
Específicos.....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Efecto Invernadero	3
Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	3
Calentamiento Global.....	3
Cambio Climático.....	4
Importancia de los Bosques ante el Cambio Climático.....	4
¿Qué es Biomasa y Volumen?.....	4
Términos Alometría y Modelo Alométrico	5
Modelos Alométricos de Biomasa y Volumen.....	5
Generalidades de la Especie	6
MATERIALES Y MÉTODOS	8
Área de Estudio	8
Cuantificación de Biomasa y Volumen.....	8
Ajuste y Selección de Ecuaciones para Cuantificar Biomasa y Volumen	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	10
Distribución de Biomasa Aérea en <i>P. halepensis</i>	12
Ecuaciones para la Estimación de la Biomasa y Volumen Total	13
Comparación de Biomasa de <i>P. halepensis</i> con otras Especies	18
CONCLUSIONES	21
REFERENCIAS	22

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas probadas para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste y ramas en <i>P. halepensis</i> en la sierra de Zapalinamé, Coahuila México.....	9
Cuadro 2. Estadísticas descriptivas de árboles muestra para generar ecuaciones de biomasa y volumen de <i>P. halepensis</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.....	10
Cuadro 3. Coeficientes de regresión y estadísticos de ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea y volumen de <i>P. halepensis</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Frecuencia del diámetro y longitud de las trozas utilizadas para cuantificar la biomasa y volumen de <i>P. halepensis</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.....	11
Figura 2. Distribución del diámetro de copa por categoría diamétrica y altura de los arboles muestreados de <i>P. halepensis</i> , en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México....	11
Figura 3. Distribución porcentual de biomasa aérea en función de altura total (A), relación B_{fr}/B_{hr} (B) y densidad de la madera de <i>P. halepensis</i> en función del diámetro basal (C).	13
Figura 4. Biomasa estimada en hojas y ramillas (A), fuste y ramas (B), total (C) y volumen (D) y comparación de la capacidad predictiva del modelo en <i>P. halepensis</i> en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.	16
Figura 5. Error porcentual estimado en biomasa de hojas y ramillas (A), fuste y ramas (B), total (C) y en volumen (D) de árboles de <i>P. halepensis</i> , en la sierra de Zapalinamé Coahuila México.	17
Figura 6. Comparación de biomasa aérea (seca y fresca) de <i>P. halepensis</i> con biomasa seca de diferentes especies (A) y estadísticos: número de observaciones (B), error de estimación (C) y de ajuste (D) de ecuaciones usadas para estimar biomasa aérea.	19
Figura 7. Relación entre diámetro normal con diámetro basal y altura (A) e índices entre diámetro basal con altura y diámetro normal (B y C) de una muestra de árboles de <i>P. halepensis</i> en la sierra de Zapalinamé Coahuila México.	20

RESUMEN

ECUACIONES DE BIOMASA AÉREA Y VOLUMEN EN *Pinus halepensis* Mill., EN
LA SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA MÉXICO

POR

JUAN CARLOS MONTOYA JIMÉNEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ-ASESOR-

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2017

Realizar estudios sobre biomasa en ecosistemas terrestres es fundamental para evaluar el ciclo del carbono y la contribución de las especies en la mitigación del cambio climático. El objetivo de este estudio fue ajustar seis ecuaciones alométricas (lineal simple, múltiple y ponderada) para estimar biomasa aérea y volumen de *Pinus halepensis* Mill. estimados mediante el método directo en la sierra de Zapalinamé Coahuila, en una muestra de 40 árboles, abarcando diámetros basales desde 25 hasta 75 cm. Los resultados indican que la biomasa de fuste y ramas (64 %) es en promedio dos veces más que la biomasa de hojas y ramillas (36 %) y porcentualmente aumenta con respecto a la altura total del árbol acorde a la ecuación: $y = 53.4 + 1.2x$. Los mejores ajustes son en volumen ($R^2 = 0.82$) y después en biomasa total ($R^2 = 0.77$) de *P. halepensis*, usando ecuaciones alométricas en forma lineal logarítmica con diámetro y altura como variable independiente ($\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db^2H)$); las mejores predicciones se registran en árboles con diámetros mayores a 30 cm. La biomasa aérea de *P. halepensis* es 2.5 veces menor que la de otras especies debido a que los árboles de esta especie se ramifican casi desde la base del árbol, en promedio el 85 % del árbol representa ramas de entre 5 y 10 cm de diámetro.

Palabras clave: ecuaciones alométricas, carbono, diámetro, *Pinus halepensis*, Saltillo.

ABSTRACT

EQUATIONS OF ABOVEGROUND BIOMASS AND VOLUME FOR *Pinus halepensis* Mill., IN THE SIERRA DE ZAPALINAMÉ, COAHUILA MÉXICO

BY

JUAN CARLOS MONTOYA JIMÉNEZ
MASTER OF SCIENCE IN PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ-ADVISOR-

SALTILLO, COAHUILA

DECEMBER 2017

Generate studies on biomass in terrestrial ecosystems is essential to assess the carbon cycle and to evaluate the contribution of species in mitigating climate change. The objective of this study was to fit six allometric equations (linear simple, multiple and weighted) to estimate aboveground biomass and volume of *Pinus halepensis* Mill., by the direct method in the Sierra of Zapaliname Coahuila, in a sample of 40 trees, including basal diameters from 25 to 75 cm. Results indicate that biomass of stem and branches (64 %) is on average twice as much as the biomass of leaves and small branches (36 %) and the percentage increases with respect to total height of tree according to the equation: $y = 53.4 + 1.2x$. The best fits are in volume ($R^2 = 0.82$) and in aboveground biomass ($R^2 = 0.77$) of *P. halepensis*, using linear-logarithmic allometric equations with diameter and height as independent variables ($\ln y = \beta_0 + \beta_1 \ln (Db^2H)$); Better predictions of the model are recorded on trees with diameters greater than 30 cm. The aboveground biomass of *P. halepensis* is 2.5 times less than that of other species and it is because the trees of this species branch out almost from the base of the tree, on average 85 % of the tree represents branches between 5 and 10 cm diameter.

Key words: allometric equations, carbon, diameter, *Pinus halepensis*, Saltillo.

INTRODUCCIÓN

Los orígenes del acelerado cambio climático han sido atribuidas a las actividades antropogénicas, especialmente a la quema de combustibles fósiles IPCC (2013); por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) aumenta en promedio 1 Gt año⁻¹, y tan solo las emisiones de CO₂eq alcanzan casi 50 Gt año⁻¹, esto ha propiciado un aumento de temperatura global de 0.05 °C en los últimos 15 años (IPCC, 2014). México se ubica entre los primeros 12 países emisores de CO₂ con 1.4 % de del total de las emisiones globales (INECC, 2013). Sin embargo, la FAO (2010) ha demostrado que los bosques, a través del procesos de la fotosíntesis, son los mayores reservorios de carbono del mundo almacenando en su biomasa 289 Gt, y varios autores (Acosta *et al.*, 2002; Avendaño *et al.*, 2009; Aguirre y Jiménez, 2011) demuestran que los ecosistemas forestales son una alternativa biótica para reducir la cantidad de CO₂ atmosférico, siendo ésta una de las mejores formas de mitigar los efectos del cambio climático. La mejor forma de estimar biomasa vegetal es a través del método directo (Méndez *et al.*, 2011) del cual se derivan ecuaciones alométricas (Chave *et al.*, 2005; Návar, 2009) no obstante, para tener mejores estimaciones de biomasa es indispensable evaluar diferentes ecuaciones (Fonseca *et al.*, 2009), usando combinaciones de variables dendrométricas fáciles de medir como diámetro normal y altura (Chave *et al.*, 2005; Návar, 2009; Méndez *et al.*, 2011), aunque otros autores (Návar *et al.*, 2004; De los Ríos y Návar, 2010; Douterlungne *et al.*, 2013) han demostrado que el diámetro basal del árbol es un buen estimador de biomasa y puede ser calculado directamente a partir del diámetro normal. La importancia de contar con ecuaciones alométricas de biomasa es que permiten cuantificar las cantidades de fijación de carbono, y con ello evaluar la contribución de las especies vegetales en el amortiguamiento de los GEI, así como aportar información para fortalecer la política ambiental y gestión silvícola. *P. halepensis* es una especie endémica del Mediterráneo Occidental, se distribuye en regiones semiáridas y sub-húmedas, en altitudes que van de 0 a 2600 msnm y precipitación anual de 350 a 700 mm (Fady *et al.*, 2003); por su rápido crecimiento, en 1929 fue introducida a México con motivos de restauración de ecosistemas (Cedeño y Pérez, 2007) y actualmente su uso se ha expandido en el centro y noreste de México. Por

la importancia y gran uso de esta especie en el norte de México, se hace necesario contar con ecuaciones alométricas para cuantificar almacenes de carbono, por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar ecuaciones alométricas y seleccionar aquella que mejor cuantifique el volumen y biomasa aérea en *P. halepensis* Mill., de la sierra de Zapalinamé, Coahuila México, partiendo del supuesto de que la biomasa y volumen de *P. halepensis* pueden ser estimados a partir del diámetro y la altura del árbol.

OBJETIVOS

General

- Ajustar ecuaciones alométricas que permitan cuantificar biomasa aérea y volumen en *Pinus halepensis* Mill., en la Sierra de Zapalinamé, Saltillo, Coahuila.

Específicos

- Seleccionar la ecuación que mejor cuantifique la biomasa aérea de *Pinus halepensis.*, en la Sierra de Zapalinamé, Saltillo, Coahuila.
- Seleccionar la ecuación que mejor cuantifique el volumen de *Pinus halepensis.*, en la Sierra de Zapalinamé, Saltillo, Coahuila.

REVISIÓN DE LITERATURA

Efecto Invernadero

Es un proceso natural en el que intervienen varios factores, se lleva a cabo gracias a la energía en forma de calor que emite el sol hacia la tierra, gran parte de esta energía recibida es emitida por la superficie terrestre y el océano y es absorbida por los gases que componen la atmósfera e incluso las nubes, se vuelve a irradiar a la tierra manteniendo una temperatura estable para que la vida pueda desarrollarse (IPCC, 2007; Caballero *et al.*, 2007).

Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Son gases de origen natural que constituyen la atmósfera sin embargo, debido a diversas actividades antropogénicas han sido alterados de manera significativa; Los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre son: dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃), aunque el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) también son dañinos (IPCC, 2014; CMNUCC, 2007). La emisión GEI aumenta en promedio 1 Gt año⁻¹, y tan solo las emisiones de CO₂eq alcanzan casi 50 Gt año⁻¹ (IPCC, 2014) y México se ubica entre los primeros 12 países en emisiones de CO₂ con 1.4 % de del total de las emisiones globales (INECC, 2013).

Calentamiento Global

Es el aumento o incremento gradual observado o proyectado de la temperatura global en la superficie, como una de las consecuencias del forzamiento radiativo provocado por las emisiones antropogénicas (IPCC, 2014) trayendo consigo muchos efectos: alteración en los patrones climáticos, derretimiento de los glaciares, alteración en la distribución de flora y fauna (Caballero *et al.*, 2007). Diversas alteraciones en nuestro ecosistema mayormente por actividades antropogénicas han permitido un aumento de temperatura de 0.05 °C en los últimos 15 años dando lugar al calentamiento global y al cambio climático (IPCC, 2014).

Cambio Climático

El IPCC (2014) define este concepto como la variación en el estado del clima con respecto a su valor medio o la variabilidad de sus propiedades que pueda ser comprobada mediante pruebas estadísticas, tal variación puede persistir durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. De acuerdo con Caballero *et al.* (2007) estas variaciones pueden atribuirse a diferentes fenómenos naturales: mínimo de Maunder, Ciclos de Milankovitch; mayormente a cambios en el contenido de CO₂ en la atmósfera los cuales en los últimos son más drásticos debido a las actividades antropogénicas (SEMARNAT, 2009; IPCC, 2013).

Importancia de los Bosques ante el Cambio Climático

Los bosques brindan la oportunidad de ser utilizados como herramientas que ayuden a disminuir los efectos del cambio climático ya sea a través de su manejo y de los productos que se derivan de estos (Moroni, 2013), por esta razón los bosques son importantes sumideros de carbono y de suma importancia en la mitigación de los gases de efecto invernadero (Aguirre y Jiménez 2011). Los ecosistemas forestales almacenan más del 80 % de su biomasa en el fuste de la cual aproximadamente en 46 % es carbono existente por encima de la superficie de la tierra (Avendaño *et al.*, 2009) en este tipo de ecosistemas hay diferentes reservorios de carbono estos pueden ser: la biomasa aérea, biomasa subterránea, hojarasca, necromasa (Galicia *et al.*, 2015; Návar, 2009). La FAO (2010) menciona que los bosques, a través del proceso de la fotosíntesis, son los mayores reservorios de carbono del mundo almacenando en su biomasa 289 Gt, y diversos autores (Acosta *et al.*, 2002; Avendaño *et al.*, 2009; Aguirre y Jiménez, 2011) demuestran que los ecosistemas forestales son una alternativa biótica para reducir la cantidad de CO₂ atmosférico, siendo ésta una de las mejores formas de mitigar los efectos del cambio climático.

¿Qué es Biomasa y Volumen?

La FAO (2004), define el término biomasa como toda materia orgánica aérea o subterránea, viva o muerta (árboles, cultivos, raíces) este término es aplicable tanto para lo que se encuentre por encima y debajo del suelo, mientras que biomasa forestal hace

referencia a todos los árboles y las plantas leñosas, incluidas las ramas, las partes superiores, las agujas, las hojas y otras partes leñosas que se encuentran un bosque (Norton *et al.*, 2003). La distribución de la biomasa por componente de acuerdo con Gayoso y Guerra (2005) se concentra mayormente en el fuste (71.35 %) seguidos de las ramas y corteza (13.44 y 10.92 %) el componente que menor cantidad de biomasa almacena son las hojas (4.28 %). Las diferencias de las concentraciones de biomasa pueden relacionarse con condiciones y calidad del sitio (Chave *et al.*, 2001; Návar, 2009); densidad del rodal (Aguirre y Jiménez, 2011). El volumen de madera en pie es una medida que refleja la cantidad de madera contenida en troncos y ramas de un área la cual generalmente se mide en metros cúbicos (m^3) (FAO, 1998). En 2010, el total mundial de existencias en formación se estima en unos 527 000 millones de m^3 esta cifra corresponde a un promedio de 131 m^3 por hectárea. Los mayores volúmenes en pie por hectárea se encuentran en Europa central y algunas zonas tropicales (FAO, 2010).

Términos Alometría y Modelo Alométrico

El término alometría se define como la relación estadística que existe entre las medidas de un árbol, por ejemplo el diámetro y la altura, diámetro y biomasa, esta relación entre medidas es la misma para todos los árboles que se han desarrollado en condiciones similares desde los más grandes a los más pequeños (Picard *et al.*, 2012). Un modelo alométrico es definido como la ecuación que describe de manera matemática la relación existente entre dos variables, la premisa básica de la alometría es que a partir de una medida es posible estimar otra (Gayon, 2000), con esta definición se deduce que un modelo alométrico para cuantificar biomasa y volumen es aquella ecuación matemática que a través de las medidas como el diámetro y altura permite cuantificar dichos componentes (Picard *et al.*, 2012).

Modelos Alométricos de Biomasa y Volumen

Las herramientas disponibles para realizar cuantificaciones de biomasa y volumen cada vez son más completas, Segura y Andrade (2008) publicaron un manual en el que se explica brevemente una metodología para construir modelos alométricos e incluso Cifuentes *et al.* 2015 publicaron un documento en el que se plasman los lineamientos

para documentar y reportar ecuaciones alométricas, los cuales son aplicables en todas las situaciones y circunstancias en las que se publique una ecuación alométrica en la literatura científica o técnica, por otra parte Picard *et al.* (2012) en su manual de construcción de ecuaciones alométricas han explicado amplia y meticulosamente una metodología para desarrollar estos métodos matemáticos para cuantificar volumen y biomasa. En la actualidad existe una gran cantidad de ecuaciones para cuantificar volumen en diferentes especies: *Pinus brutia* Ten., *Pinus eldarica* Medw., *Pinus halepensis* Mill., y *Pinus estevezii* Mart., (Návar y Domínguez, 1997); *Pinus cooperi*, *P. durangensis*, *P. engelmannii*, *P. leiophylla*, y *P. herrerae* (Corral y Návar 2009); *Pinus greggii* Engelm (Muñoz *et al.*, 2012); *Pinus lawsonii* y *Pinus oocarpa* (Ramos *et al.*, 2014) y *Pinus ayacahuite* Ehren (Ramírez *et al.*, 2016), a pesar de que todos estos trabajos fueron realizados con diferentes especies persiguen un objetivo en común y es cuantificar el volumen. La cuantificación de la biomasa no es menos importante y diversos autores e instituciones lo han sustentado (Chave *et al.*, 2005; Segura y Andrade 2008; FAO, 2010) ya que a partir de su cuantificación se hace posible realizar cálculos aproximados sobre las cantidades de fijación de carbono en los bosques forestales (Fonseca *et al.*, 2009; Méndez *et al.*, 2011; Cuenca *et al.*, 2014; Aguirre y Jiménez, 2011). Las especies para las que se han desarrollado ecuaciones alométricas son las siguientes: *Clethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* Schl. Lundell., *Alnus glabrata* Fernald., *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Inga sp.*, y *Quercus peduncularis* Née (Acosta *et al.*, 2002); *Abies religiosa* (Avendaño *et al.*, 2009); *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote* y *Quercus spp.*, (Aguirre y Jiménez 2011); *Guazuma ulmifolia*, *Trichospermum mexicanum*, *Inga vera* y *Ochroma pyramidale* (Douterlungne *et al.*, 2013). En México se han desarrollado alrededor de 478 ecuaciones alométricas en diferentes especies y componentes, sin embargo, *P. halepensis* Mill., no se encuentra dentro de este listado de ecuaciones generadas (Rojas *et al.*, 2015).

Generalidades de la Especie

Pinus halepensis Mill., es una conífera que alcanza alturas de hasta 20 m, el diámetro del tronco oscila entre 80 y 100 cm, la corteza es grisácea y lisa en árboles jóvenes y agrietada en arboles viejos; las acículas son de color verde claro dispuestas en grupos de

dos (ocasionalmente tres) entre 6 y 12 cm de largo y menos de 1 mm de ancho; los conos son moderadamente seróticos y de color gris a marrón rojizo entre 5 y 12 cm de longitud; se caracteriza por un sistema de raíces profundas; su nombre deriva de la ciudad de Alepo (Haleb) en la costa de Siria (Mauri *et al.*, 2016). En la región mediterránea *Pinus halepensis* Mill., es una conífera tolerante a la sequía y de rápido crecimiento, se distribuye principalmente en las costas, se usa para la protección del suelo y cortinas rompevientos cerca de las costas (Mauri *et al.*, 2016). Es una especie muy afectada por los incendios sin embargo, presenta conos seróticos favoreciendo la rápida regeneración después del fuego (Tsitsoni, 1997). En México fue introducida aproximadamente en varias entidades de la república, principalmente en las zonas semiáridas donde las precipitaciones son escasas, es usada para protección y restauración de suelos deficientes de humedad, es usado como especie ornamental en parques y jardines además de tener potencial para cortinas rompevientos por su corta altura (CONAFOR, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

Esta investigación se realizó en una plantación establecida en la sierra de Zapalinamé ubicada al sureste de Saltillo Coahuila, México, localizada en las coordenadas 25° 20' 41.75" N y 101° 01' 30.63" O (Datum WGS84), altitud de 1800 msnm, la precipitación varía desde 250 a 400 mm, presenta un clima árido semicálido (Bsohw), con temperatura entre 18 y 22 °C (García, 1988).

Cuantificación de Biomasa y Volumen

El estudio se realizó con información de 40 árboles de *P. halepensis* que fueron seleccionados para su derribo durante la ampliación de la carretera Saltillo - Zacatecas durante el 2015. Antes de ser derribados los árboles fueron medidos en diámetro a la base (Db), diámetro normal (Dn) diámetro de copa (Dc) y altura total (H); cada árbol se derribó y troceó a longitudes de no más de 150 cm, para después separarlo en componentes: 1) hojas y ramillas (ramas < 5 cm diámetro) y 2) fuste y ramas (ramas > 5 cm diámetro). A cada componente se le determinó su peso fresco total con báscula Tecno Cour (capacidad de 100 kg y 0.5 kg de precisión), para muestras de peso pequeño, el peso se obtuvo con báscula marca Nuevo León (capacidad de 10 kg y 0.1 kg de precisión). Del componente de cada árbol se obtuvieron cinco muestras de entre 2 kg (hojas y ramas) y 7 kg (fuste) kg, las cuales fueron pesadas en fresco para determinar contenido de humedad. Las muestras se secaron en estufa marca Blue M. modelo 246F serial No. P6-800 a temperatura de 70 °C hasta obtener peso constante. La biomasa seca fue calculada a partir del contenido de humedad y peso fresco del componente (Picard *et al.*, 2012) definiéndose como: biomasa de hojas y ramillas Bhr , biomasa de fuste y ramas Bfr , y por suma de ambas, biomasa total, Bt . El volumen de cada troza se calculó a partir de la fórmula de Smalian y por sumatoria de todas se obtuvo el volumen total del árbol.

Ajuste y Selección de Ecuaciones para Cuantificar Biomasa y Volumen

Para cuantificar biomasa y volumen de *P. halepensis* se probaron seis ecuaciones alométricas (Cuadro 1) propuestas por Picard *et al.* (2012), obteniendo sus coeficientes de regresión por el método de mínimos cuadrados. La selección del mejor modelo estadístico se obtuvo acorde a lo sugerido por Chave *et al.* (2005) es decir, usando un criterio de penalización de máxima verosimilitud, el Criterio de Información Akaike (AIC) y error estándar del modelo (S_{xy}), además se consideraron otros estadísticos e indicadores de capacidad predictiva de los modelos: criterio de información Bayesiano (BIC), coeficiente de determinación ajustado (R^2 aj.) coeficiente de variación (CV), pero siempre considerando la significancia estadística de los coeficientes de regresión ($p \leq 0.01$) (Douterlungne *et al.*, 2013; Cuenca *et al.*, 2014). Para corregir el sesgo causado por la transformación logarítmica en “y”, se obtuvo el factor de corrección ponderado (Sprugel, 1983). Los análisis estadísticos se realizaron usando el programa R (R Development Core Team 2007).

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas probadas para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste y ramas en *P. halepensis* en la sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

No.	Ecuación	Tipo de ajuste	Varianza
1	$\ln(y) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln(Db) + \varepsilon$	Lineal simple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
2	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db) + \varepsilon$	Lineal simple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
3	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db^2 H) + \varepsilon$	Lineal simple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
4	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Db) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon$	Múltiple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$
5	$y = \beta_0 + \beta_1 Db^2 H + \varepsilon$	Lineal ponderada	$\text{Var}(\varepsilon) = \alpha Db^{2c}$
6	$y / Db = \beta_0 / Db^2 + \beta_1 H + \varepsilon$	Lineal simple	$\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$

Donde: y = biomasa (de cada componente en kg) y volumen (m^3); Db = diámetro a la base (cm); H = altura total (m); β_0 , β_1 y β_2 = coeficientes de regresión; \ln = logaritmo natural; ε = error; σ = varianza; α y c = coeficientes de ponderación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 40 árboles muestra, el 67.5 % mostraron bifurcación en el fuste por debajo de 1.3 m de altura, el resto (13 árboles) no mostraron este patrón. El diámetro basal de los árboles promedió 46.86 ± 10.75 cm, 13.5 cm más que el diámetro normal. La altura varió de 7.1 a 13.8 m; la biomasa total (seca) mínima fue de 102.1 ($Db = 26.9$ cm) y la máxima de 1352.3 kg ($Db = 75.4$ cm). La variación más baja ocurre en la altura total de árbol (19 %) y la más alta en volumen del árbol (53 %), éste último varió desde 0.130 a 1.338 m³ (Cuadro 2). Del muestreo de estos árboles, se obtuvieron 3,508 secciones, midiendo un total de 7,016 diámetros (mayor y menor) de los cuales el 85 % varió de 5 a 10 cm, el resto se repartió desde 15 hasta 75 cm de diámetro, la mayor cantidad de secciones tuvieron menos de 100 cm de longitud (Figura 1), los diámetros de copa presentan una clara relación alométrica con el diámetro basal y la altura (Figura 2).

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas de árboles muestra para generar ecuaciones de biomasa y volumen de *P. halepensis*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

Estadístico	<i>Db</i>	<i>Dn</i>	<i>H</i>	<i>Dc</i>	<i>Bhr</i>	<i>Bfr</i>	<i>Bt</i>	<i>Vol</i>
Promedio	46.86	33.36	9.83	7.58	175.84	349.05	524.89	0.592
Mínimo	26.90	30.00	7.12	4.48	23.41	78.65	102.06	0.130
Máximo	75.45	39.50	13.86	12.30	487.67	864.70	1352.37	1.338
Desv. estándar	10.75	3.10	1.86	1.75	84.70	183.07	257.61	0.313
Varianza	10.75	9.63	1.87	1.75	83.91	183.07	258.26	0.310
Coe. de variación	22.94	9.30	18.92	23.09	48.17	52.45	49.08	52.87

Donde: *Db* = diámetro a la base (cm); *Dn* = diámetro normal (cm); *H* = altura (m); *Dc* = diámetro de copa (m); *Bhr* = biomasa en hojas y ramillas (kg); *Bfr* = biomasa en fuste y ramas (kg); *Bt* = biomasa total (kg); *Vol* = volumen (m³).

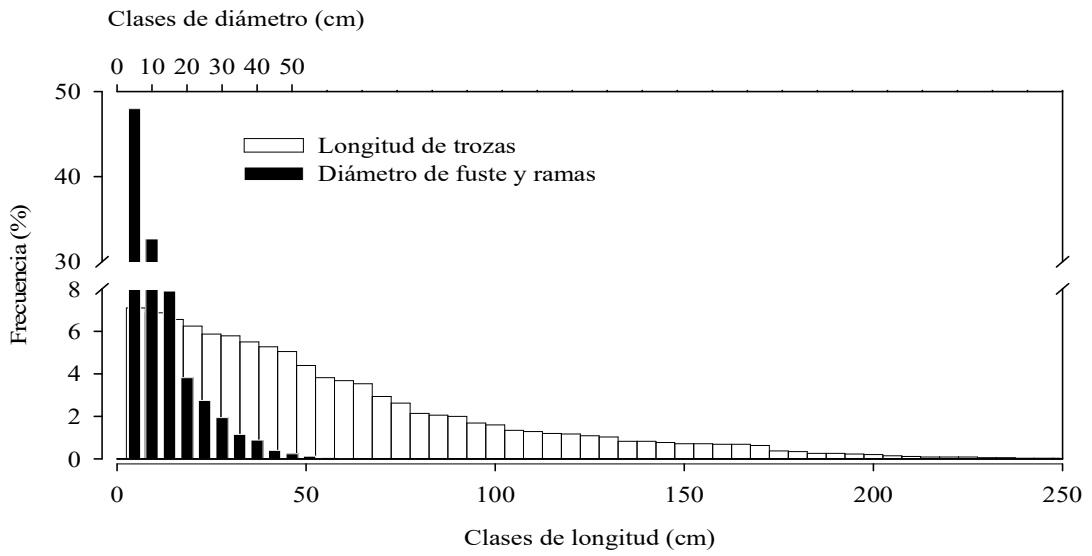


Figura 1. Frecuencia del diámetro y longitud de las trozas utilizadas para cuantificar la biomasa y volumen de *P. halepensis*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

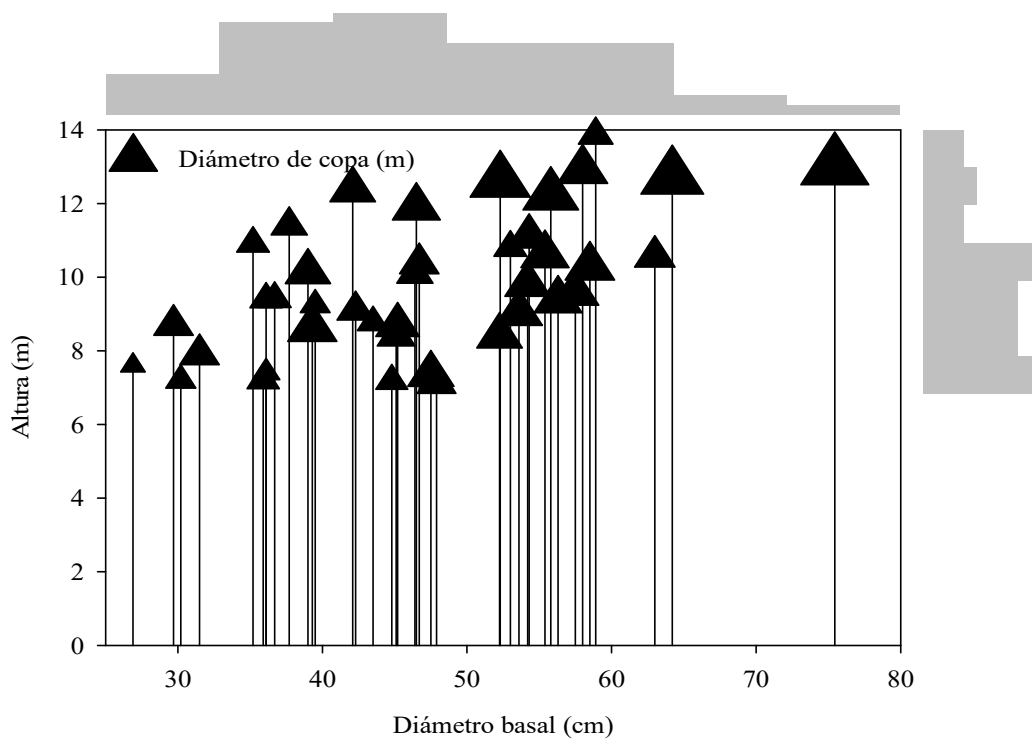


Figura 2. Distribución del diámetro de copa por categoría diamétrica y altura de los arboles muestreados de *P. halepensis*, en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

Distribución de Biomasa Aérea en *P. halepensis*

En *P. halepensis* la mayor cantidad de biomasa aérea se concentra en el fuste y ramas (64 %) con respecto a biomasa total, el resto (en hojas y ramillas) representa en promedio 36 %; este patrón es similar en *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* el cual es de 60 y 58 % en fuste y de 40 y 42 % en hojas y ramas (Méndez *et al.*, 2011). En *Pinus montezumae* el mayor porcentaje de biomasa se presenta en fuste (77 %), en ramas y hojas este valor promedia 9 % (Carrillo *et al.*, 2014). Rodríguez *et al.* (2012) encuentran que en *P. patula*, la distribución de biomasa es de 92.9; 4.7 y 2.4 % para madera, ramas y follaje, respectivamente. En árboles de *Abies religiosa*, la biomasa en fuste llega a ser casi el 85 % del total, en ramas es de 7 % y en hojas únicamente 8 % (Avendaño *et al.*, 2009). A pesar de que las hojas representan la menor cantidad de biomasa con respecto al total, algunos autores (Rodríguez *et al.*, 2012) sugieren que ésta debe ser estimada con precisión especialmente por la relación fotosíntesis y productividad primaria neta, y específicamente en *P. halepensis* López *et al.* (2013) demuestran que las hojas son el componente más activo, cuyas variaciones dependen de precipitación y temperatura y en el cual ocurre el mayor flujo de carbono de la vegetación al suelo. El análisis de resultados demostró que el porcentaje biomasa de fuste y ramas de *P. halepensis* incrementa significativamente ($p < 0.05$) con la altura total del árbol, aproximadamente 1.2 % por cada unidad de altura; por consecuencia, la biomasa de hojas y ramillas (en porcentaje) disminuye con la altura del árbol (1.3 % según parámetro b del modelo de regresión lineal) (Figura 3A). La relación Bfr / Bhr indica que en *P. halepensis* la biomasa de fuste y ramas es en promedio 2.02 veces más que la biomasa de hojas (Figura 3B). Con la relación de la biomasa total y el volumen de cada árbol la densidad de la madera de *P. halepensis* (volumen de fuste y ramas / biomasa de fuste y ramas) promedia 0.607 ton/m^3 (Figura 3C) y es menos variable en árboles con diámetro basal menor a 45 cm (C.V. = 8.46 %) que con respecto a árboles con diámetro mayor a éste (16.42 %). El valor de densidad básica de la madera de *P. halepensis* de este estudio es muy similar al reportado por Centre de la Propietat Forestal (2004) para esta misma especie (0.610 ton/m^3).

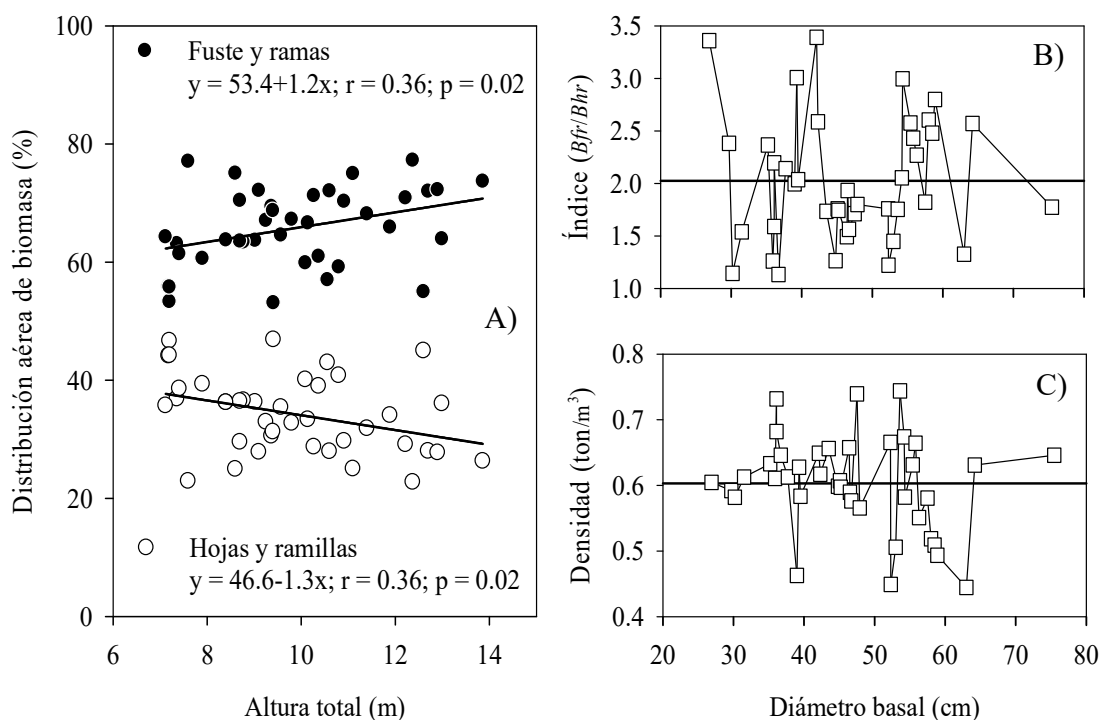


Figura 3. Distribución porcentual de biomasa aérea en función de altura total (A), relación Bfr/Bhr (B) y densidad de la madera de *P. halepensis* en función del diámetro basal (C).

Ecuaciones para la Estimación de la Biomasa y Volumen Total

Solo las ecuaciones de mejor ajuste y sus estadísticos se presentan en resultados (Cuadro 3), en este sentido la ecuación 3 (Cuadro 1), la cual es la forma lineal del modelo alométrico: $y = e^a x^b$, y es una variación del modelo de potencia ($y = ax^b$), usando “x” como una variable combinada diámetro y altura, fue la que mejor estimó biomasa de fuste, total y volumen, siendo en este mismo orden de menor a mejor ajuste del modelo (R^2 de 0.74 a 0.82). Aunque los ajustes de los modelos de este estudio no son muy altos, en ningún caso se eliminaron árboles que produjeran “outliers”. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos ($p < 0.0001$), la variación (C.V.) más alta del modelo se observó en biomasa de ramas (26.70 %) y la menor en volumen (22.63 %). El factor de corrección mejoró las estimaciones de biomasa (de todos los componentes) y de volumen en únicamente 3 % (Cuadro 3). En este como en varios estudios, se ha demostrado que la biomasa total es la que mejor se estima (e.g. Návar, 2009; Fonseca *et*

al., 2009; Méndez *et al.*, 2011; Cuenca *et al.*, 2014) independientemente de la especie y género (Aguirre y Jiménez, 2011), pero en todos los casos la biomasa de ramas presenta la mayor variación y por ende el ajuste más bajo. La estimación de biomasa de hojas y ramas; fuste y ramas; biomasa total; y volumen puede observarse en las Figuras 4A - 4D. Al comparar la precisión de estimación (biomasa y volumen) de la ecuación seleccionada, se muestra que en general los datos observados *versus* estimados, de los árboles que van de $34 < Db < 60$ cm se distribuyen (normalmente) por encima y debajo de la recta $y = x$, (relación 1:1), en árboles con diámetro basal fuera de estos límites, la ecuación sobreestima y subestima (área sombreada) respectivamente la biomasa y volumen de *P. halepensis* (Figuras 4E - 4H). Las distancias verticales más grandes (errores en la predicción) son básicamente cuatro árboles cuyos diámetros basales son de 36.7, 42.1, 58.9 y 63 cm, distribuidos en diferentes categorías de diámetro. La ecuación con la variable combinada (diámetro-altura) que mejor predice biomasa de *P. halepensis* de este estudio, ha sido también la que mejor estima volumen en esta (Návar y Domínguez, 1997) y en otras especies (Muñoz *et al.*, 2012).

Cuadro 3. Coeficientes de regresión y estadísticos de ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea y volumen de *P. halepensis* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

No.	Modelo	R^2_{aj}	S_{xy}	CV	Valor de p	AIC	BIC	FC
1	$Ln(Bhr) = Ln -2.5619 (\pm 1.48) + 1.9910 (\pm 0.38) Ln(Db)$	0.70	46.49	26.70	$1.27e^{-12}$	16.27	21.34	1.03
3	$Ln(Brf) = -2.6779 (\pm 1.49) + 0.8463 (\pm 0.15) Ln(Db^2H)$	0.74	92.81	26.59	$9.02e^{-14}$	15.39	20.46	1.03
3	$Ln(Bt) = -1.8737 (\pm 1.34) + 0.8077 (\pm 0.13) Ln(Db^2H)$	0.77	124.74	23.84	$1.36e^{-14}$	6.62	11.69	1.03
3	$Ln(Vol) = -9.7582 (\pm 1.33) + 0.9161 (\pm 0.13) Ln(Db^2H)$	0.82	0.13	22.63	$2.36e^{-16}$	6.26	11.33	1.03

Donde: Ln = logaritmo natural; Bhr = biomasa en hojas y ramillas (kg); Bfr = biomasa en fuste y ramas (kg); Bt = biomasa total (kg); Vol = volumen (m^3); R^2_{aj} = coeficiente de determinación ajustado; S_{xy} = error estándar (kg); CV = coeficiente de variación (%); valor de p = significancia estadística; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de Información Bayesiano; FC = factor de corrección; \pm = intervalo de confianza (95 %) del coeficiente de regresión.

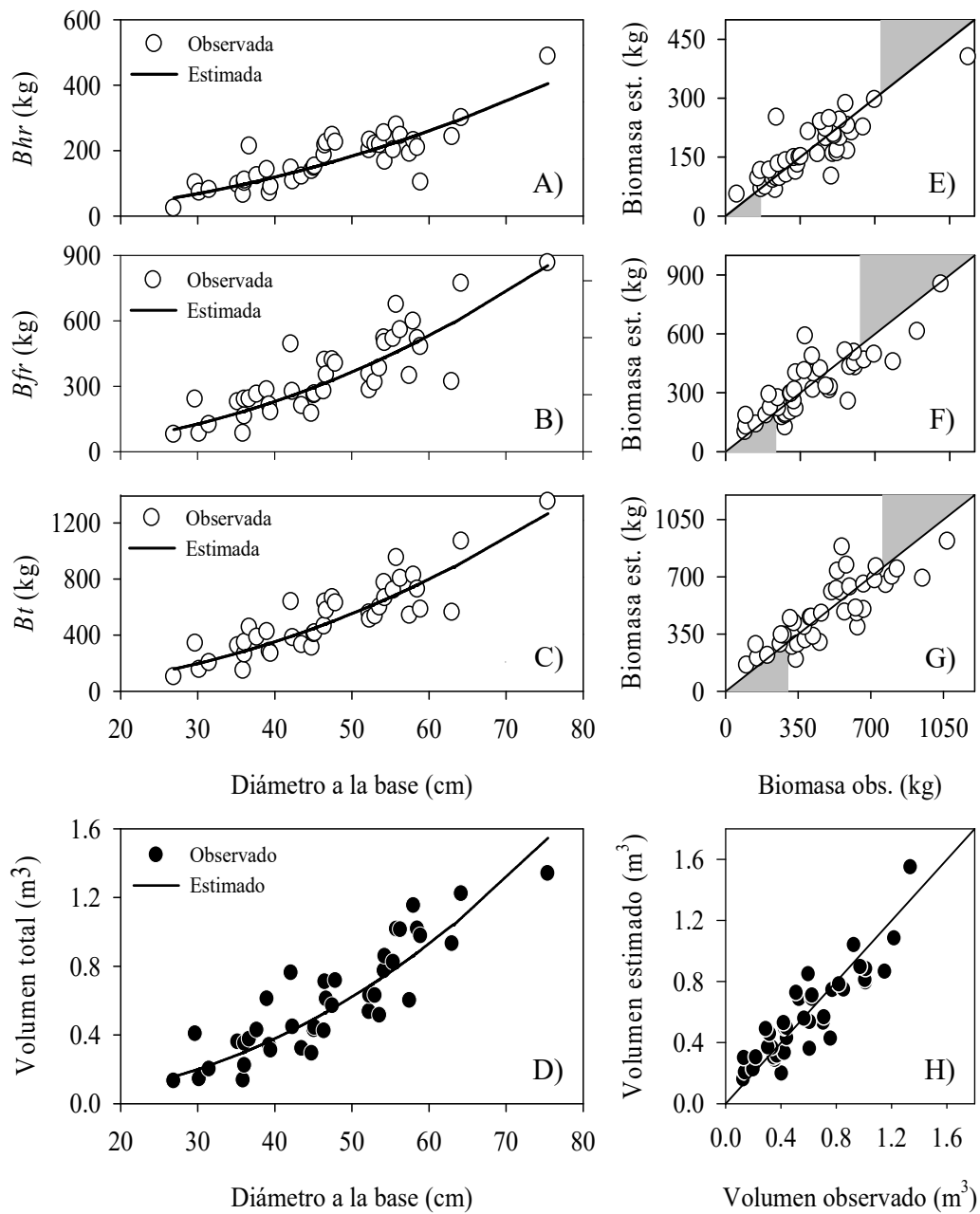


Figura 4. Biomasa estimada en hojas y ramillas (A), fuste y ramas (B), total (C) y volumen (D) y comparación de la capacidad predictiva del modelo en *P. halepensis* en la Sierra de Zapalinamé, Coahuila México.

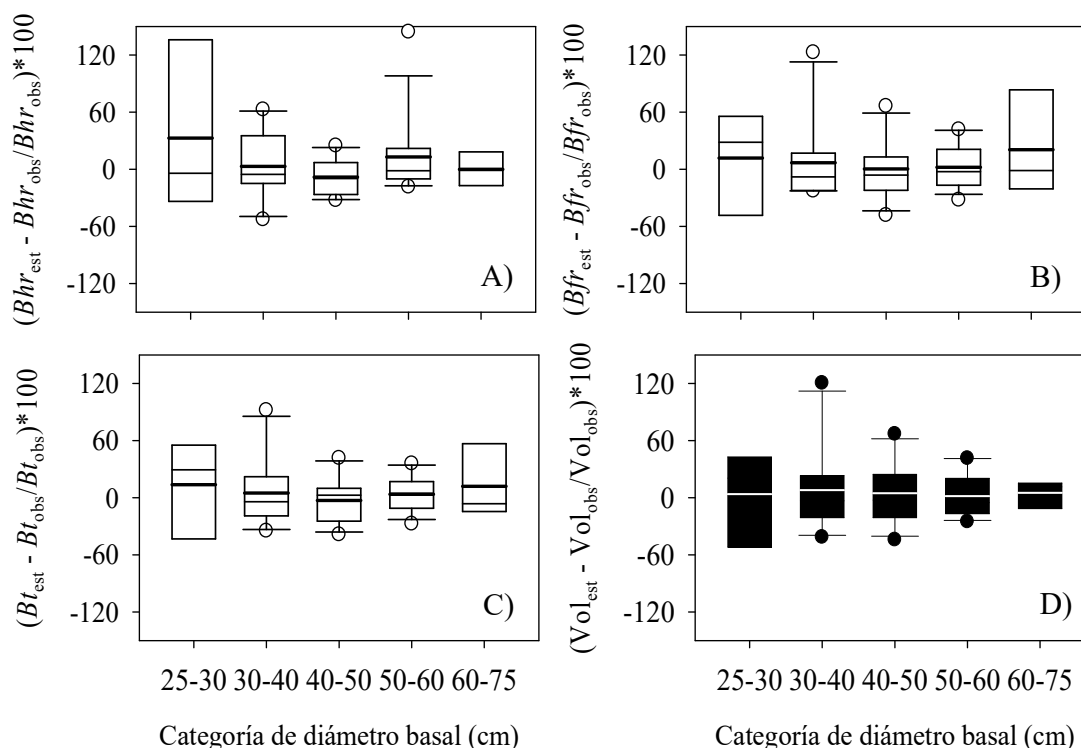


Figura 5. Error porcentual estimado en biomasa de hojas y ramillas (A), fuste y ramas (B), total (C) y en volumen (D) de árboles de *P. halepensis*, en la sierra de Zapalinamé Coahuila México.

Visto de forma porcentual, el error promedio (línea gruesa del gráfico) más alto ocurre con biomasa de hojas y ramillas en la categoría de diámetro de 25 a 30 cm, promediando 32 % (Figura 5A); en esa categoría, en biomasa de fuste (Figura 5B) y total (Figura 5C), el error promedia solo 11.3 y 13.8 % respectivamente. Los errores más bajos se registran en las categorías de $30 < Db < 60$ cm, promediando 2.1, 3.0 y 0.9 % en biomasa de hojas y ramillas (Figura 5A), de fuste y ramas (Figura 5B) y total (Figura 5C). El modelo de volumen es el que arroja la mejor distribución de residuales en todas las categorías de diámetro (Figura 5D), promediando 4.7 % (línea blanca del gráfico) pero en todos los casos la ecuación sobreestima.

Comparación de Biomasa de *P. halepensis* con otras Especies

Estableciendo un diámetro normal común de 25, 35 y 45 cm, considerando todas las especies (Figura 6A) en promedio poseen desde 2.0, 2.2 y 2.4 veces más biomasa que *P. halepensis*, a la categoría de diámetro correspondiente, representando en promedio 130, 326 y 644 kg más, pero variando desde 1.5 veces más en *P. arizonica* (Návar, 2009) (en 25 cm), hasta 3.2 veces más en *P. montezumae* (Carrillo *et al.*, 2014) (en 45 cm). Cabe destacar que la biomasa seca de especies reportadas por Brown (1997), Návar (2009) y de Carrillo *et al.* (2014) (Figura 6A), es aún mayor que el peso verde de *P. halepensis* de este estudio, variando desde 1.2 (*P. arizonica*) hasta 1.8 veces más (*P. montezumae*), pero en promedio 1.2 veces más que *P. halepensis*. El peso verde de *P. halepensis* (reportado aquí) es similar al peso seco de *P. pseudostrobus* (Aguirre y Jiménez, 2011). Diferencias de almacenes y de estimación de biomasa específicas e inter-específicas han sido documentadas anteriormente por Návar (2009) y Chave *et al.* (2001) demostrándose que estas son dependientes de las condiciones de crecimiento de donde se obtiene la muestra (Méndez *et al.*, 2011) de la calidad de sitio (Návar, 2009) y a la misma especie y densidad del rodal (Aguirre y Jiménez, 2011). El número de árboles con que se desarrollan las ecuaciones de biomasa es variable, desde 15 (Carrillo *et al.*, 2014) hasta 384 (Návar, 2009) (Figura 6B), particularmente en México más del 50 % de los estudios de ecuaciones alométricas para cuantificar biomasa se han construido con n de 10 a 40 árboles. La magnitud del error de estimación de biomasa no es totalmente dependiente de la dimensión de la variable y (Figura 6C), sino que depende del tipo de modelo (simple, múltiple) y del número de variables independientes consideradas. Los ajustes de los modelos reportados en la literatura (Figura 6D) son altos ($R^2 > 0.91$), mayor que en *P. halepensis* y no son proporcionales al tamaño de muestra. Algunos autores han sugerido incluir en el modelo la densidad de la madera (Chave *et al.*, 2005; Picard *et al.*, 2012) o usar modelos múltiples y polinomiales (Chave *et al.*, 2005) con densidad, área del tronco, diámetro y altura para mejorar la estimación de biomasa.

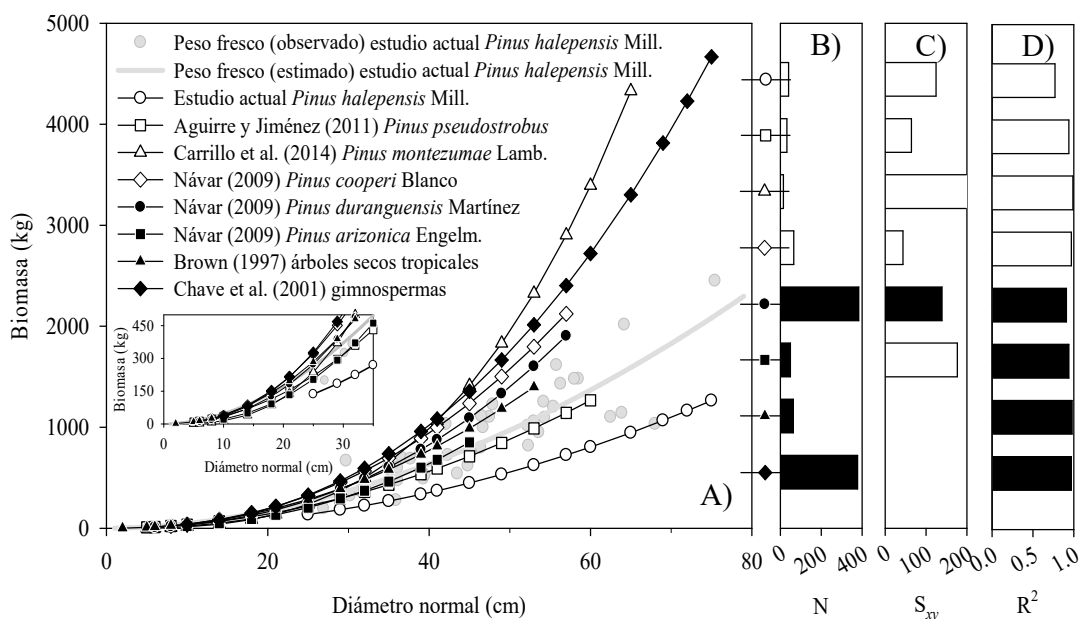


Figura 6. Comparación de biomasa aérea (seca y fresca) de *P. halepensis* con biomasa seca de diferentes especies (A) y estadísticos: número de observaciones (B), error de estimación (C) y de ajuste (D) de ecuaciones usadas para estimar biomasa aérea.

La mayoría de las ecuaciones alométricas se han desarrollado con diámetro normal (Picard *et al.*, 2012; Cuenca *et al.*, 2014), aunque por las características del árbol (especie) y practicidad, algunos autores (Návar *et al.*, 2004; De los Ríos y Návar, 2010; Douterlungne *et al.*, 2013) han usado diámetro basal en alometría. El análisis de una muestra de 122 árboles de *P. halepensis* obtenida de la misma área de estudio demuestra una alta correlación ($R = 0.98$) entre D_n y D_b (Figura 7A) y paralelismo (misma pendiente, $b = 1.00$) con la ecuación $y = x$, dicha la ecuación se desplaza hacia arriba sólo 7.31 unidades de D_b con respecto a la relación 1:1. Es decir, para uso de las ecuaciones de este estudio y especie, la transformación de D_n a D_b puede hacerse eficientemente por medio de la ecuación reportada (Figura 7A); la relación de diámetro basal vs con altura (Figura 7C) y diámetro normal (Figura 7D), siguen una tendencia logarítmica negativa.

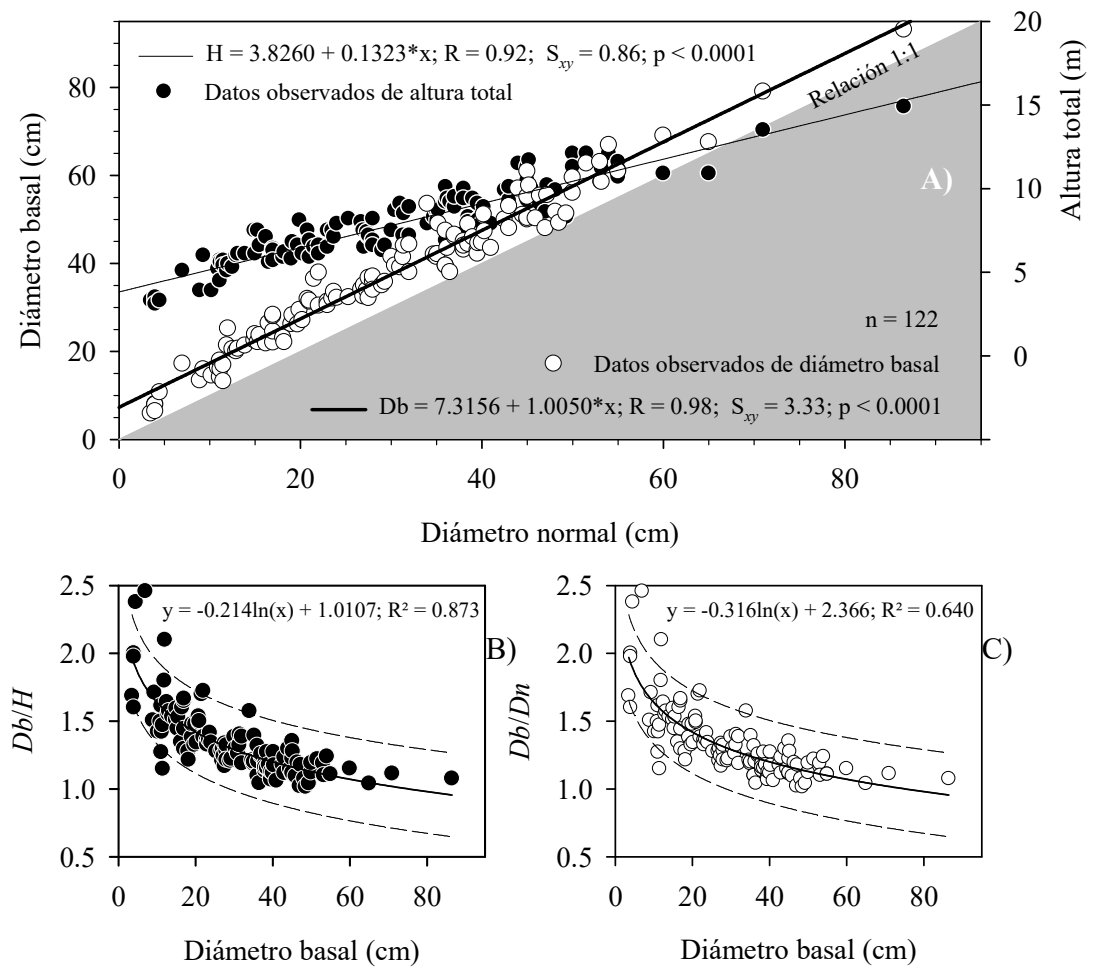


Figura 7. Relación entre diámetro normal con diámetro basal y altura (A) e índices entre diámetro basal con altura y diámetro normal (B y C) de una muestra de árboles de *P. halepensis* en la sierra de Zapalinamé Coahuila México.

CONCLUSIONES

La mejor predicción de biomasa aérea y volumen de *P. halepensis* se logra usando en la ecuación la variable combinada diámetro y altura en forma logarítmica; el diámetro por si solo arroja estimaciones sesgadas. Los errores más altos (subestimación) de biomasa aérea de *P. halepensis* ocurren en las categorías de diámetro inferiores, lo cual es debido a la alta variación de diámetro-altura y viceversa, pero también a la mayor variación de biomasa de hojas y ramas que ocurren en la parte baja del árbol. La biomasa aérea de *P. halepensis* llega a ser de hasta 2.5 veces menos que la de otras especies, y es explicada porque a diferencia de otras especies ésta se ramifica casi desde la base del árbol, en promedio el 85 % del árbol representa ramas de entre 5 y 10 cm de diámetro, contrario a lo que registra la mayoría de las coníferas que poseen fustes rectos de hasta 20 m o más.

REFERENCIAS

- Acosta M., M., J. Vargas H. A. Velásquez M. y J. D. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6): 725-736.
- Aguirre C., O. A., y J. Jiménez P. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6): 73-83.
- Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A., y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Fitotecnia* 32(3): 233-238.
- Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (FAO Forestry Paper 134), Rome, pp 55.
- Caballero M., S. Lozano y B. Ortega. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria* 8: 2-12.
- Carrillo A., F., M. Acosta M., E. Flores A., J. E. Juárez B., E. Bonilla P. 2014. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5(5): 779-793.
- Cedeño G., H. and D. R. Pérez S. 2007. La legislación forestal y su efecto en la restauración en México. Instituto Nacional De Ecología. Consultado agosto de 2016. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/467/cedenoyperez.html>.
- Centre de la Propietat Forestal 2004. Annexe Indicadors dendromètrics En: Manual de redacció de plans tècnics de gestió i millota forestal (PTGMF) i plans simples de gestió forestal (PSGF). Instruccions de redacció i l'inventari forestal. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Centre de la Propietat Forestal. Barcelona, España. pp 211-314.
- Chave J., B Riéra, and M-A. Dubois. 2001. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology* 17: 79-96.
- Chave J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.-P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riera, and T. Yakamura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1): 87-99.

- Cifuentes M. J., M. Henry, M. Réjou M., C. Wayson, M. Z. Cuartas, D. Piotta, F. Alice G., H. Castañeda L., E. Castellanos L., R. Cuenca L., K. Cueva R., J. Del Águila P., A. Duque M., J. Fernández V., A. Jiménez G., O. R. López, L. Gunnar M., J. M. Michel F., F. Milla, J. de J. Návar Ch., E. Ortiz M., J. Pérez, C. Ramírez Z., L. Rangel G., R. Rubilar P., L. Saint A., C. Sanquetta, C. Scott, J. Westfall. (2015). Guidelines for documenting and reporting tree allometric equations. *Annals of Forest Science* 72: 763-768.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2001. SIRE-Paquetes Tecnológicos, *Pinus halepensis* Miller., pp 1-7.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). 2007. Guía de la Convención sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto. 39 pp.
- Corral R. S. y J. de J. Návar C. 2009. Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 5-13.
- Cuenca M. E., O. Jadán., K. Cueva., C. Aguirre. 2014. Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *CEDAMAZ* 4(1): 21-31.
- De los Ríos C., E., and J. J. Návar C. 2010. Root allometry of two subtropical plant communities of northeastern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12(1): 123-134.
- Douterlungne D., A. M. Herrera G., B. G. Ferguson., I. Siddique., y L. Soto P. 2013. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia* 47: 385-397.
- Fady B., H. Semerci., and G. Vendramin G. 2003. Technical guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and Brutia pine (*Pinus brutia*). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. 6 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1998. Terms and Definitions. FAO Forest Resources Assessment Programme, Working Paper 1. Roma, Italia.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004. actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005. Términos y definiciones. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 36 pp.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 346 pp.
- Fonseca G., W., F. Alice G., y J. M. Rey B. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30 (1): 36-47.
- Galicia L., V. Saynes y J. Campo. 2015. Biomasa Aérea, Biomasa Subterránea y Necromasa en una Cronosecuencia de Bosques Templados con Aprovechamiento Forestal. *Botanical Sciences* 93(3): 473-484.
- García, E. 1988. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Climas, Clasificación de Köeppen, modificado por García. Carta de Climas, escala 1:1 000 000. México.
- Gayon, J. 2000. History of the concept of allometry. *American Zoologist* 40 (5): 748-758.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013: Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Stocker, T.F., D. Qin, G-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. 204 pp.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014: Climate Change. 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1435 pp.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2013. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp 1-39.
- López L., J. D., J. Méndez G., J. A. Nájera L., J. Cerano P., J. D. Flores F., y J. A. Nájera C. 2013. Producción de hojarasca en *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus cembroides* Zucc. y su relación con algunos factores climáticos. *Agrociencia* 47(5): 497-510.

- Mauri, A., Di Leo, M., de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, 2 p.
- Méndez G., J., S. L. Luckie N., M. A. Capó A., y J. A. Nájera L. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl., y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45(4): 479-491.
- Méndez G., J., O. A. Turlan M., J. C. Ríos S., y J. A. Nájera L. 2012. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13) 57-72.
- Moroni, M. T. 2013. Simple models of the role of forests and wood products in greenhouse gas mitigation, *Australian Forestry* 76(1) 50-57.
- Muñoz F., H. J., J. C. Velarde R., J. J. García M., J. T. Sáenz R., E. H. Olvera D., y J. Hernández R. 2012. Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(14): 11-22.
- Návar J., P. A. Domínguez. 1997. Ajuste de modelos de volumen y funciones que describen el perfil diamétrico de cuatro especies de pino plantadas en el nordeste de México. *Sistemas Forestales* 6(1): 147-162.
- Návar Ch., J. J. 2010. Alometría para biomasa en especies arbóreas del Noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12: 507-519.
- Návar Ch., J. J., N. González B., J. J. Graciano L., V. Dale and B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10(2): 17-28.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257(2): 427-434.
- Norton, G., S. Abraham, And A. Veneman. 2003. Memorandum of understanding on policy principles for woody biomass utilization for restoration and fuel treatments on forests, woodlands, and rangelands. USDA For. Serv. and Bureau of Land Management, Washington, DC. 7 p.
- Picard, N., L. Saint-André, y M. Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier. 223 p.

- R Development Core Team. 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>.
- Ramírez M. A., W. Santiago G., G. Quiñonez B., F. Ruiz Aquino y P. Martínez A. 2016. Modelos de volumen fustal para *Pinus ayacahuite* Ehren. Revista Mexicana de Agroecosistemas 3(2): 61-74.
- Ramos U. J. A., J. J. García M., J. Hernández R., X. García C., J. C. Velarde R., H. J. Muñoz F. y G. G. García E. 2014. Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de pinus de la Sierra Purhépecha, Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 5(23): 92-109.
- Rodríguez O., G., H. M. De Los Santos P., V. A. González H., A. Aldrete., A. Gómez G., y A. M. Fierros G. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. Madera y Bosques 18(1): 25-41.
- Rojas G. F., B. H. J. De Jong, P. Martínez Z., F. Paz P. 2015. Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. Annals of Forest Science 72: 835-864.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2009. Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. México. 81 p.
- Segura M. y H. J. Andrade. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. Agroforestería en las Américas 46: 89-96.
- Sprugel, D. G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology 64: 209-210.
- Tsitsoni, T. 1997. Conditions determining natural regeneration after wildfires in the *Pinus halepensis* (Miller, 1768) forests of Kassandra Peninsula (North Greece). Forest Ecology and Management 92: 199-208.