



**Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo**
**Instituto de Investigaciones Agropecuarias
y Forestales**



Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas

Doctorado en Ciencias Biológicas

Opción: Ciencias Agropecuarias, Forestales y Ambientales

**Biomasa aérea y contenido de carbono en plantaciones forestales
comerciales de *Pinus pseudostrobus* mediante el uso de
ecuaciones alométricas**

Autor:

David Eduardo Dávila Molina

Como requisito para optar al título de:

Doctor en Ciencias Biológicas

Director:

Dr. Leonel López Toledo.

Codirector:

Dr. Óscar Alberto Aguirre Calderón.

Morelia, Michoacán, Agosto de 2023.



**Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo**
**Instituto de Investigaciones Agropecuarias
y Forestales**



Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas

Doctorado en Ciencias Biológicas

Opción: Ciencias Agropecuarias, Forestales y Ambientales

**Biomasa aérea y contenido de carbono en plantaciones forestales
comerciales de *Pinus pseudostrobus* mediante el uso de ecuaciones
alométricas**

Autor:

David Eduardo Dávila Molina

Como requisito para optar al título de:

Doctor en Ciencias Biológicas

Director:

Dr. Leonel López Toledo

Codirector:

Dr. Óscar Alberto Aguirre Calderón.

Comité sinodal:

Dra. Selene Ramos Ortíz.

Dra. Mariela Gómez Romero.

Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero.

Morelia, Michoacán, Agosto de 2023.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por todas las bendiciones recibidas y sobre todo a mis amados padres María del Carmen Molina y Ricardo Dávila, por su gran apoyo y amor en cada etapa de mi vida, pues sin su sacrificio y esfuerzo, seguramente no habría alcanzado este logro.

A mi amada esposa Ivonne Murillo por su apoyo, comprensión, paciencia, su sonrisa y su amor, que día a día estuvo presente recorriendo un camino para construir un presente y futuro, tanto en lo personal como en la investigación y la ciencia. A mi hijo Diego Guillermo, quién me brindó muchos momentos de alegría y apoyo, para continuar adelante y así mismo me ayudó a aprender nuevas facetas de la vida.

A mi director el Dr. Leonel López Toledo, parte fundamental para el desarrollo de este trabajo quien me brindó sus conocimientos, su acompañamiento y su apoyo, para sacar adelante este trabajo de investigación.

Al Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero, quien estuvo pendiente de mi, desde mi admisión al doctorado y me brindó su apoyo en momentos difíciles, así como también me dio la oportunidad de asistir a sus clases y aprender de sus conocimientos y disfrutar de su metodología para enseñar.

Agradecer también a mi Codirector el Dr. Oscar A. Aguirre Calderón y a los miembros del jurado, la Dra. Selene Ramos Ortíz, la Dra. Mariela Gómez Romero y Dr. Cuauhtémoc Sáenz Romero, quienes me apoyaron académicamente en este trabajo con sus conocimientos, experiencias y observaciones.

A mi gran amigo Uriel Vargas y a su querida madre Alicia Mejorada (que en paz descanse). Personas muy especiales conmigo durante todo este proceso de formación, quienes me abrieron las puertas de su hogar y sus corazones.

A mi amigo Jorge Lara, por sus palabras de aliento en momentos difíciles, sus buenos consejos y su gran amistad.

Al Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas, por darme la oportunidad de ser su estudiante y realizar este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por permitirme ser uno de sus becarios y ayudarme económicamente durante el desarrollo de este estudio.

A mi amigo y mentor, el profesor Román Ospina de la Universidad del Cauca, quien me ayudó a formarme como profesional, con su conocimiento, experiencia y estuvo pendiente de mis padres y de mi proceso en México.

A Carlos Calero y Diana Castillo por su amistad incondicional a pesar de la distancia, sus palabras de aliento y su buen humor, me hacen sentir menor la distancia entre mi país natal y México.

A mis vecinos mexicanos Dalia, Miguel y Salvador, por su amistad, compañía y gran apoyo durante la pandemia y el resto de nuestra estadía como sus vecinos, permitiendo tener nuevos lazos de amistad.

DEDICATORIAS

El esfuerzo constante, la dedicación, la esperanza, el apoyo incondicional y el amor que mis padres, mi esposa e hijo, me han brindado día a día se ven reflejados en los logros académicos que he alcanzado. Por esto y mucho más este trabajo de investigación va dedicado a mi madre María del Carmen Molina, a mi padre Ricardo Dávila, a mi hermosa esposa Ivonne E. Murillo S. y a mi hijo Diego Guillermo Villaseñor M. quienes me acompañaron en este camino lleno de emociones, conocimiento y aventuras, inspirándome y fortaleciéndome en diferentes facetas y etapas que juntos hemos superado y seguimos recorriendo. Con todo mi corazón, les dedico este logro académico.

RESUMEN

Las actividades humanas que se han venido desarrollando durante milenios, tales como ganadería, pesca, industrialización, tecnología, transporte, explotación de recursos naturales, etc., generan diariamente emisiones de cuatro de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) de larga permanencia: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo). Esto se ha convertido en la mayor preocupación de la humanidad, en los últimos 30 años, generando diversos estudios al respecto del cambio climático, la biomasa, el contenido de carbono y las emisiones generadas en diferentes campos. Debido a esto, el presente estudio está dirigido a la obtención de valores de biomasa y contenido de carbono principalmente, en plantaciones forestales. Este estudio, se desarrolló en Plantaciones Forestales Comerciales (PFC), de *Pinus pseudostrobus* Lindley, pertenecientes a la Comunidad Indígena de San Juan Nuevo Parangaricutiro (CISJNP), en el estado de Michoacán, al occidente de México. En este estudio se evaluaron características dendrométricas tales como diámetro normal, diámetro a diferentes secciones, altura de sección, altura total, número de ramas, diámetro de ramas, largo de ramas, densidad de la madera, peso de ramas, hojas y las trozas o secciones de cada árbol, utilizando muestreos destructivos y no destructivos, con la finalidad de obtener volumen de madera, biomasa y contenido de carbono en PFC de tres edades diferentes 10, 15 y 20 años, por lo que el contenido de los capítulos en esta investigación, se concentran en dos grandes propósitos: El primero, evaluar cinco modelos matemáticos de estimación de volumen de madera (teoría moderna), a través de la obtención del factor de forma (FF) y volumen (V) mediante métodos seccionales (teoría clásica). Se obtuvo como resultado un FF de 0.506 en general. Los modelos matemáticos de estimación de volumen que mejor ajuste presentaron fueron los de Schumacher-Hall para las edades de 10 y 15 años, mientras que el modelo Australiano fue el mejor para la edad de 20 años y para el modelos que contiene todas las edades evaluadas (AGM). En segundo lugar, teniendo los valores de volumen y densidad de la madera específicos para cada edad e individuo, se calculó la biomasa y el carbono contenido en las PFC de *P. pseudostrobus* y posteriormente se evaluaron cinco modelos matemáticos para la estimación de biomasa aérea (BM). De lo anterior se obtuvieron resultados como densidad aparente de la madera (DA) de 0.39, 0.405 y 0.555 g/cm^3 , para edades de 10, 15 y 20 años respectivamente y los modelos que mejor ajuste tuvieron para la

estimación de biomasa aérea fueron nuevamente Schumacher-Hall para las edades de 10 y 15 años y el modelo Australiano para la edad de 20 años. Este estudio tiene como objetivo general “Evaluar la variación del volumen y el contenido de carbono en biomasa aérea, estimada a través de la obtención de ecuaciones alométricas, con base en plantaciones forestales comerciales de distintas edades en *Pinus pseudostrabus*”. Consideramos que con los resultados obtenidos se logró responder a la pregunta de investigación ¿Con los valores de volumen de madera y biomasa aérea de PFC de *Pinus pseudostrabus*, se tendrá una relación directa o indirecta en función de la edad de la plantación y con esto, será posible generar un modelo matemático de predicción de estos valores en cualquier edad?

Palabras clave: Ecuaciones de volumen, estimación de biomasa, factor de forma, *Pinus pseudostrabus*.

ABSTRACT

The present study was developed in Commercial Forest Plantations (PFC), of *Pinus pseudostrabus* Lindley, belonging to the Indigenous Community of San Juan Nuevo Parangaricutiro (CISJNP), in the state of Michoacán in western Mexico. In this study, dendrometric and phenological characteristics were evaluated, such as normal diameter, diameter to different sections, section height, total height, number of branches, diameter of branches, length of branches, density of wood, weight of branches, leaves and the logs or sections of each tree, using destructive and non-destructive sampling, in order to obtain volume of wood, biomass and carbon content in PFCs of three different ages 10, 15 and 20 years, so the content of the chapters in this research, concentrate on two main purposes; the first, to evaluate five mathematical models of estimation of wood volume (modern theory), through the obtaining of the form factor (FF) and volume (V) by sectional methods (classical theory), obtaining as a result an FF of 0.506 in general and that the mathematical models of volume estimation that best fit presented were those of Schumacher-Hall for the ages of 10 and 15 years, while the Australian model was the best for the age of 20 and for the models containing all assessed ages (AGM). Secondly, having the values of volume and density of the wood specific to each age and individual, the biomass and carbon contained in the PFCs of *P. pseudostrabus* were calculated and subsequently five mathematical models were

evaluated for the estimation of aerial biomass (BM), where results were obtained as bulk density of the wood (A D) of 0.39, 0.405 and 0.555 g/cm³, for ages 10, 15 and 20 years respectively and the models that had the best fit for the estimation of aerial biomass were again Schumacher-Hall for the ages of 10 and 15 years and the Australian model for the age of 20 years. This research study has as its general objective "To evaluate the variation of the volume and carbon content in aerial biomass, estimated through the obtaining of allometric equations, based on commercial forest plantations of different ages in *Pinus pseudostrabus*". With the results obtained, it was possible to answer the research question: With the volume values of wood and aerial biomass of PFC of *Pinus psedostrobus*, will there be a direct or indirect relationship depending on the age of the plantation and with this, it will be possible to generate a mathematical model of prediction of these values at any age?

Keywords: Volume equations, biomass estimation, form factor, *Pinus pseudostrabus*.

Contenido

1. CAPÍTULO I: Generalidades	1
1.1 Introducción general	2
1.2 Antecedentes.....	5
1.2.1. Plantaciones forestales Comerciales (PFC)	7
1.2.2. Manejo forestal en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan, Parangaricutiro, Michoacán (CINSP).	9
1.3 Justificación	10
1.4 Preguntas de investigación	12
1.5 Objetivos.....	12
1.5.1 Objetivo General.....	12
1.5.2 Objetivos Específicos	13
1.6 Área de estudio	14
Figura 1.1 Mapa de vegetación de la CINSP. Fuente: CINSP 2018.....	15
1.7 Métodos generales	15
1.8 Variables de medición en árboles	16
1.8.1 Diámetro Normal (DN)	16
1.8.2 Mediciones del DN en diferentes tipos de terrenos	17
1.8.3 Medición de alturas	17
1.9 Volumen de fustes (Métodos seccionales)	19
1.10 Factor de forma.....	20
1.10.1 Factor de forma absoluto	21
1.10.2 Factor de forma artificial o falso	21
1.10.3 Factor de forma natural, verdadero.....	21
1.11 Biomasa	22
1.12 Referencias.	24
2. CAPITULO II: La edad contribuye a la estimación del volumen y factor de forma de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindley en plantaciones forestales comerciales del occidente de México	
30	
• Introduction	32
<i>Study area</i>	36
<i>Study species</i>	37

<i>Experimental design</i>	38
<i>Sectional methods to estimate volume and form factor</i>	39
<i>Mathematical forest models to estimate stem volume</i>	41
• Results 43	
<i>Mathematical forest models</i>	45
• Discussion	48
• Conclusions	52
3. CAPITULO III: Biomasa aérea y el carbono contenido en <i>Pinus pseudostrobus</i> en San Juan Nuevo, Michoacán	62
3.1 Introducción.....	65
3.2 Metodología.....	67
3.2.1 Área de estudio	67
3.2.2 Especie estudiada.....	68
3.2.3 Muestreo	69
3.2.4 Volumen y densidad de la madera.....	69
3.2.5 Biomasa aérea.....	71
3.2.6 Carbono contenido.....	71
3.2.7 Modelos matemáticos evaluados.....	72
3.3 Resultados.....	73
3.3.1 Volumen.....	
3.3.2 Densidad de la madera.....	74
3.3.3 Biomasa aérea y carbono contenido	75
3.3.4 Modelos matemáticos	76
3.4 Discusión	79
3.5 Conclusiones.....	83
3.6 Referencias	84
4. CAPITULO IV: Discusión General	89
4.2 Conclusiones.....	94
4.3 Referencias	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Models used to estimate the volume of <i>Pinus pseudostrabus</i> in commercial forest plantations in CINSJP, Western Mexico. V = Volume of the stem; ND = normal diameter; H = Height of the stem; b ₀ , b ₁ , b ₂ , b ₃ = regression parameters.	42
Tabla 2.2	Volume and form factor for <i>Pinus pseudostrabus</i> of different age and by applying a destructive and non-destructive method. DC = diametric class; ND = normal diameter (cm); H = height (m); VD = volume by destructive method (m ³); VND = volume by non-destructive method (m ³); FFD = form factor by destructive method; FFND = form factor by non-destructive method; SE = standard error.....	44
Tabla 2.3	Results obtained for each model in the 3 assessed ages and an age general model (lumping the three ages) for Forest Commercial Plantations of <i>Pinus pseudostrabus</i> at CINSJP at Western Mexico. Statistics are as follow: F= test statistic; Var= variance; SEE= standard error of estimation; RMSE= root mean square error; CV%= coefficient of variation; R ² = R square; R ² adj= R square adjusted; SW/KS= Shapiro Wilk and Kolmogorov Smirnov. Numbers in brackets indicate the weight to identify the best performed model for each statistic and the WT represent the weighted total, which is the sum of all weight. The best model for each age were those with the lowest WT indicate in bold according to (Ramos et al., 2013).	46
Tabla 2.4	Regression parameters and equations for the three ages and the Age General Model (AGM). The best model for each age was one of the five tested. V = volume; ND = normal diameter; H = height; b ₀ , b ₁ , b ₂ , b ₃ = regression parameters.	47
Tabla 3.1	Modelos utilizados para la estimación de biomasa de <i>P. pseudostrabus</i> , en plantaciones forestales comerciales de la CINSJP, occidente México. BM = Biomass; ND = normal diameter; H = Height of the stem; b ₀ , b ₁ , b ₂ , b ₃ = regression parameters.	72
Tabla 3.2	Biomasa aérea y contenido de carbono, en PFC de <i>P. pseudostrabus</i> , con edades de 10, 15 y 20 años.	75
Tabla 3.3	Modelos matemáticos de estimación de biomasa, para cada edad de la PFC de <i>P. pseudostrabus</i>	77
Tabla 3.4	Parámetros estadísticos de los modelos matemáticos, para la estimación de biomasa aérea, en cada edad evaluada para <i>P. pseudostrabus</i>	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa de vegetación de la CINSP. Fuente: CINSP 2018.....	15
Figura 1.2	Definición de la altura de medición del DN en (a) arboles rectos, normales y terreno bajo 1,3 m de altura en el fuste; (c) arboles bifurcados sobre 1,3; (d) árbol defectuoso a la altura de 1,3 m; (e) arboles inclinados; (f) en terreno con pendiente. Fuente: (Cancino, 2012).	17

Figura 2.1	Differences in a) form factor and b) volume among ages in commercial forest plantations of <i>Pinus pseudostrobus</i> at Western Mexico. Numbers above the bars indicate the exact values of both variables. Statistical differences among ages are indicated by letters based on Tukey test ($p < 0.05$). $N_{Age10} = 30$, $N_{Age15} = 45$, $N_{Age20} = 90$, $N_{total} = 165$	45
Figura 2.2	Best performed models to estimate volume for each age and lumping all ages (AGM) for <i>Pinus pseudostrobus</i> in commercial forest plantation at Western Mexico. For age 10 and 15 the best model was Schumacher-Hall, while for 20 and AGM the Australian model was the one with lowest WT. The equation, including the regression parameters, and the R^2_{adj} for each age are shown. $V =$ Volume, $ND =$ Normal diameter and $H =$ Height.....	48
Figura 3.1	Volumen promedio para cada clase diamétrica. a: edad 10 con 2 CD; b: edad 15 con 3 CD; c: edad 20 con 6 CD; CD: Clase diamétrica; V: Volumen	73
Figura 3.2	Densidad de la madera de <i>P. pseudostrobus</i> , en tres edades y distintas clases diamétricas. a: edad 10 con 2 CD; b: edad 15 con 3 CD; c: edad 20 con 6 CD; CD: Clase diamétrica; DA: Densidad aparente.....	74
Figura 3.3	Resultados de la BM para las tres edades evaluadas de <i>P. pseudostrobus</i> . a: edad 10 con 2 CD; b: edad 15 con 3 CD; c: edad 20 con 6 CD; BR= biomasa de ramas; BH= biomasa de hojas; BF= biomasa de fuste; BM: Biomasa aérea.....	76
Figura 3.4	Modelos matemáticos resultantes, para la estimación de BM en cada edad evaluada. a: edad 10; b: edad 15; c: edad 20; BM: Biomasa aérea; ND: Diámetro normal; H: Altura; R^2 : Coeficiente de determinación.....	78

1. CAPÍTULO I: Generalidades

1.1 Introducción general

Debido a las actividades humanas, como ganadería, pesca, industrialización, tecnología, transporte, explotación de recursos naturales, etc., se generan emisiones de cuatro de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) de larga permanencia: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo). Las concentraciones de estos gases en la atmósfera mundial han aumentado considerablemente alrededor del año 1750, con el inicio de la Revolución Industrial, que provocó el aumento exponencial de las actividades industriales y tecnológicas, lo que demandaba el aprovechamiento indiscriminado de recursos naturales, generando la emisión masiva de GEI, que en la actualidad exceden por mucho a los valores preindustriales (antes de la Revolución Industrial). En 2005, las concentraciones de CO_2 y CH_4 en la atmósfera excedieron considerablemente el intervalo de valores naturales de los últimos 650 000 años (IPCC, 2007; PNUMA, 2007) y actualmente ya se exceden los 415 ppm de CO_2 (Ripple et al., 2019).

La FAO (2006) (Food and Agricultural Organization of the United Nations) y el IPCC, (2007) (Intergovernmental Panel on Climate Change) reconocieron oficialmente a los bosques naturales y plantados como sumideros de captura de GEI, estableciendo que el potencial de captura de carbono está ligado al potencial de la formación de biomasa. De ahí que las regiones donde resultan factibles altos rendimientos de biomasa sean las zonas de mayor potencial de captura de carbono (Torres & Guevara, 2002). Es por esto que, los sistemas forestales representan un papel importante, ayudando a reducir las concentraciones de CO_2 en la atmosfera y por tanto ayudan a mitigar el efecto del cambio climático global (Brown & Kappelle, 2001; IPCC, 2007; Ordóñez et al., 2001). Por ello es importante incrementar las masas forestales, mediante forestación y reforestación (Dixon et al., 1994).

Durante los últimos años se han realizado estudios sobre caracterización forestal en el estado de Michoacán, por parte de instituciones universitarias y organizaciones de carácter ambiental, mediante prácticas académicas, proyectos de investigación y monitoreo a ecosistemas específicos (COFOM, 2007). En algunas de estas actividades se han realizado

trabajos sobre cuantificación de captura de carbono, evaluación de progenies y modelos alométricos para algunas especies forestales (Cambrón-Sandoval et al., 2013).

En este estudio, se realizó una investigación sobre el contenido de biomasa aérea y contenido de carbono en PFC de *P. pseudostrobus*, de tres edades diferentes (10, 15 y 20 años), pertenecientes a la Comunidad Indígena San Juan Nuevo Parangaricutiro (CISJNP). Durante el desarrollo del trabajo se obtuvieron diferentes productos como: el factor de forma específico, modelos matemáticos de estimación de volumen, densidad de la madera, modelo de estimación de biomasa aérea y contenido de carbono para cada una de las edades evaluadas. De ahí que el contenido principal de este estudio se concentró en dos grandes temas; el primero en el factor de forma y volumen de madera, obteniendo al final de ese capítulo, modelos de estimación de volumen; y el segundo tema se trató de la biomasa aérea y el contenido de carbono, para lo cual fue necesario obtener la densidad de la madera y utilizar los resultados del capítulo anterior, todo en torno a la diferenciación de las edades de las plantaciones evaluadas.

Comúnmente, los métodos que se utilizan en la estimación de volúmenes consideran las clases de diámetro, pero no la edad de los individuos (García et al., 2016). Algunos estudios de factores de forma, como los desarrollados en PFC por (Cruz de León et al., 2006); (Rodríguez-Ortiz et al., 2020), mostraron diferencias significativas en los factores de forma entre las edades evaluadas. Así mismo, se encontró que una clase diamétrica, puede estar contenida en diferentes edades debido a la presencia de árboles suprimidos, competencia natural y otros factores que intervienen en el ambiente que se desarrolla cada plantación (West, 2009). Al comparar las estimaciones de volumen, que solo consideran el diámetro, con los métodos que además consideran la edad, se encontró que los resultados de volumen de madera, con esta segunda metodología, dan una mejor estimación por cada individuo. Por lo tanto, se identificó que, en la PFC, es esencial considerar la edad de los individuos al aplicar modelos matemáticos de volumen para obtener una mejor precisión en los valores estimados, lo que permite generar un plan de manejo y aprovechamiento forestal más preciso y confiable, en cuanto a los productos que se obtendrán de las PFC de interés.

En cuanto a la estimación del carbono contenido en la biomasa aérea forestal de las edades de 10, 15 y 20 años de las PFC de *P. pseudostrobus*, se utilizaron dos métodos para obtención de datos en campo, el destructivo y no destructivo, en donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos y posteriormente se pudo realizar una evaluación de cinco modelos matemáticos para la estimación de biomasa aérea, mediante la utilización de las variables independientes como el diámetro normal (DN) y la altura (H). La estimación de la biomasa aérea y el contenido de carbono en las PFC de la CISJNP, es de vital importancia para los planes de manejo y aprovechamiento forestal de la comunidad, en los cuales se podrá incluir los valores encontrados para cada edad y replicar el estudio en las otras plantaciones de las edades que no fueron evaluadas, con el fin de llevar un registro de lo que tiene cada una de sus plantaciones y poder acceder a otros rubros como el pago por servicios ambientales con entidades gubernamentales o incluso con organizaciones internacionales, que requieren ciertos estándares, en cuanto a las cantidades de volumen, biomasa aérea y contenido de carbono por hectárea y la calidad de las plantaciones según IPCC (2007) y (COFOM, 2007).

Con el desarrollo de los capítulos referentes a factor de forma, volumen, biomasa y contenido de carbono, esta investigación centra su atención en la edad de las plantaciones, como un posible factor determinante en las estimaciones de las variables mencionadas anteriormente y los modelos matemáticos resultantes, para cada plantación de determinada edad. Por ello la pregunta de investigación que se pretende resolver es: ¿Con los valores de volumen de madera y biomasa aérea de PFC de *Pinus pseudostrobus*, se tendrá una relación lineal o no lineal en función de la edad de la plantación y con esto, será posible generar un modelo matemático de predicción de estos valores en cualquier edad? Pregunta que, al ser evaluada en este estudio, se logró resolver dentro del objetivo general mediante la evaluación de la variación del contenido de carbono en biomasa aérea, estimada a través de la obtención de ecuaciones alométricas, generadas a partir de la edad de las plantaciones forestales comerciales de 10, 15 y 20 años en *P. pseudostrobus*. Se cumplió con una de las hipótesis planteadas donde se pueda generar un modelo matemático que presente un alto ajuste (R^2_{adj} mayor a 85%), ya sea que involucre todas las edades (Modelo General de Edades) o un modelo para cada una de las edades evaluadas.

1.2 Antecedentes

Entre los estudios que se han realizado en el estado de Michoacán sobre el tema de captura de carbono se encuentran: Martínez-Gordillo et al. (2013), quienes estimaron la captura de carbono y biomasa aérea, en el predio de “Cerro Grande” municipio de Tancítaro; el estudio de (Ordóñez Díaz et al., 2015) quienes investigaron sobre el contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jarácuaro (Michoacán, México). En otros estados de México, también se encuentran estudios sobre estimación de biomasa y carbono tales como: (Garcidueñas Martínez, 1987), quien trabajó en un rodal de *P. montezumae* del Campo Experimental Forestal San Juan Tetla, en Puebla, reportando que el 93.4% de la biomasa estimada en el rodal, pertenecía a *P. montezumae* y que el porcentaje restante a otras especies latifoliadas. Nájera-Luna, (1999), en su trabajo de tesis de maestría, ajustó ecuaciones de estimación de biomasa para diez especies típicas de Matorral Espinoso Tamaulipeco, encontrando que la biomasa aérea se distribuía en las hojas en un 4%, en las ramas 61% y en los fustes 35%. Acosta-Mireles et al. (2011), generó ecuaciones alométricas con un R^2 mayor a 0.97, para seis especies forestales de bosque mesófilo de montaña y bosque de encino, en el estado de Oaxaca. Avendaño Hernandez et al. (2009), en el estado de Tlaxcala, realizó estimaciones de biomasa y carbono, para la especie *Abies religiosa*, con una muestra de 26 árboles, donde la mayor concentración de biomasa se dio en el fuste con un 84.5%, mientras que, en ramas y hojas fue del 6.9% y 8.6% respectivamente. Méndez-González et al., (2011), realizó un estudio en el municipio de Jerécuaro, perteneciente al estado de Guanajuato, donde evaluaron 2 especies de pinos; *P. devoniana* y *P. pseudostrobus*, tomando como muestra 20 individuos de cada especie y obteniendo ecuaciones de estimación de biomasa con un R^2 superior a 0.85 y con resultados de biomasa aérea fustal con 60.2% y 58.4%, mientras para ramas y hojas 39.8% y 41.6%, para *P. devoniana* y *P. pseudostrobus* respectivamente. Carrillo Anzures et al. (2016), llevó a cabo un estudio en el Parque Nacional Izta-Popo, con una muestra de 29 árboles de la especie *P. hartwegii*, obteniendo una distribución de la biomasa aérea del 65.3% en el fuste, 24.2% en las ramas y 10.9% en las hojas, además la ecuación de estimación de biomasa con un R^2 de 0.98. de Díaz-Ríos et al., (2016), desarrollaron su estudio en San Pablo Ixayoc, en Texcoco, Estado de México, con una muestra de 10 árboles de *Alnus acuminata*, pertenecientes a bosque de galería, utilizando

un método no destructivo, los resultados obtenidos fueron; densidad de la madera 0.62 Mg m^{-3} , factor de forma de 0.66 y la distribución de la biomasa en fuste del 64.92%, en ramas de 27.06% y en hojas de 8.02%.

En el Continente Americano (excluyendo a México), también hay gran cantidad de artículos y trabajos en cuanto a estimación de biomasa y carbono, entre ellos se encuentran Schlegel et al., (2000), quienes escribieron un manual de procedimientos para realizar inventarios forestales, encaminados a la obtención del contenido de carbono y biomasa aérea y total, donde explican desde las mediciones dendrométricas en campo, hasta la etapa de análisis de los resultados. (Woodall et al., 2010), pertenecientes a United States Department of Agriculture (USDA), evaluaron una serie de ecuaciones para el cálculo de volumen, biomasa aérea y contenido de carbono, a partir de datos obtenidos de varios inventarios forestales realizados por Northern Research Station en la localidad de Rocky Mountain y estados hacia el sur. Boca et al., (2017), trabajaron en la generación de modelos predictivos para la estimación de biomasa aérea en *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, donde obtuvieron R^2 de 0.97 para fustes, 0.75 para hojas o acículas y 0.68 para ramas, en bosques ubicados en Misiones Norte, Argentina.

En otros países en el mundo, se citan varios estudios relacionados con la obtención de biomasa y carbono en plantaciones forestales, ejemplos de ello, en Europa, Köhl et al., (2017), mediante el análisis de los anillos de crecimiento de 61 árboles de las especies *Cedrela odorata*, *Hymenaea courbaril* y *Goupia glabra*, con edades entre 84 y 255 años, mostraron una acumulación promedio de carbono durante su último cuarto de vida, entre 39% (*C. odorata*) y 50% (*G. glabra*). en el medio oriente y Asia, donde se tienen publicaciones de: Vashum, (2012), en su artículo sugieren una serie de métodos, para la estimación de biomasa aérea, mediante muestreos destructivos y no destructivos, que incluyen derribo de árboles, sensores remotos y ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa aérea y contenido de carbono. Rutishauser et al., (2013), en su estudio, compararon seis modelos alométricos usando la variable altura (H), para la estimación de biomasa aérea y contenido de carbono, con resultados de R^2 entre 0.912 y 0.964. (Ostadhashemi et al., 2014), al norte de Irán, realizaron estudios de las especies forestales que ahí se encontraban,

en un área de 1757 has y teniendo como resultados de 81.13 y 98.21 t ha⁻¹ para *Acer velutinum*, 68.36 y 83.44 t ha⁻¹ para *Quercus castanifolia*, 71.88 y 119.22 t ha⁻¹ para *Tilia begonifolia*, 56.07 y 61.98 t ha⁻¹ para *Fraxinus excelsior* y 37.92 a 51.34 t ha⁻¹ para *Prunus avium*.

En estos estudios y evaluaciones mencionadas anteriormente, se ha notado que cumplen con la estimación de biomasa y carbono en diversos medios forestales sin embargo, en ninguno de los anteriores se reportan valores de las variables específicas de factor de forma, volumen, biomasa y contenido de carbono para cada clase diamétrica, según la edad o incluso, se generar ecuaciones alométricas para cada una de ellas, esto generó el interés de este caso de estudio que particularmente, se desarrolló una estimación detallada de estas variables que son importantes debido a que cambia significativamente con la edad y el tipo de crecimiento de las especies arbóreas.

1.2.1. Plantaciones forestales Comerciales (PFC)

Durante la década de los años 80's, se incrementó en gran medida el establecimiento de PFC, con el propósito de abastecer las necesidades de las comunidades y de la industria maderera y su creciente demanda de los productos derivados del bosque, como son; celulosa, madera para construcción, usos industriales, aserrío, chapas y combustible vegetal (Chazdon et al., 2016; D'Amato et al., 2017; FAO, 2020). Además de los productos ya mencionados, las PFC aportan otros servicios enfocados a favorecer el medio ambiente para algunas empresas que lo requieran, por ejemplo, según la FAO, (2010), las plantaciones forestales son alternativas estratégicas que ayudan a incrementar la captación del carbono, en una manera rápida y eficaz, representando hasta el 2007, más de 190 millones de hectáreas (has), a nivel global (5% de la cobertura forestal total).

De acuerdo con los informes presentados por la FAO, (2020) y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2021), la superficie boscosa a nivel global está compuesta principalmente por bosques naturales, que al año 2020 representaban el 97.7% del total y las plantaciones forestales (2.3%). Los resultados de los estudios realizados por estas organizaciones mostraron que existía una considerable disminución del bosque natural

de 150 millones de hectáreas, mientras que las plantaciones forestales, solo presentaron un aumento de 14 millones de hectáreas, cifra que no alcanza a mitigar las pérdidas de los bosques naturales. La pérdida de superficie de bosque se relaciona mayormente con el cambio de uso de la tierra, con actividades como agricultura, silvicultura y ganadería, en menor medida, por la expansión de las ciudades y la construcción de carreteras asociadas a actividades económicas variadas. Entre las especies más plantadas a nivel mundial, se encuentran el género *Pinus* que ocupa el primer lugar con más del 20%, seguido por los géneros *Eucalyptus*, *Evea*, *Acacia* y *Tectona*, 10%, 5%, 4% y 3%, respectivamente. En cuanto a especies latifoliadas en conjunto ocupan un 18% y otras especies de coníferas 11% (FAO, 2020; Velázquez et al., 2015).

Las PFC, tienen dos metas principales: a) Abastecer a la industria con productos maderables y no maderables; b) La provisión de servicios como la protección de suelo, agua y la rehabilitación de tierras afectadas por desmostes, cambio de uso de suelo, incendios y plagas forestales (CONAFOR, 2017; Kanninen, 2010). Los antecedentes de las PFC en México se remontan a 1932 con el primer registro del establecimiento de una PFC de *Populus* spp. en Chalco, México, para el abastecimiento de la empresa de cerillos “La imperial”. En 1953 la empresa “Fibracel, S. A.” inició un programa de PFC para abastecer su industria de tableros aglomerados, estas plantaciones se establecieron en el municipio de Tamuín, San Luis Potosí (Muñoz-Flores et al., 2011).

En el periodo 2000-2017 la superficie de PFC establecidas en México con el apoyo de la CONAFOR fue 337,735 ha (CONAFOR, 2017). Los bosques de México han contribuido con valiosos bienes y servicios a la población, la madera ha sido desde la perspectiva económica, el bien más importante (Caballero-Miranda, 2017). Las PFC con fines maderables se distribuyen en mayor proporción en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, el cedro rojo y el eucalipto son las especies que mayormente se han plantado (Velázquez et al., 2015). De 2007 a 2012, la producción maderable proveniente de las PFC fue de 1.3 millones de m³, lo que representó el 3.4% de la producción nacional reportada por la SEMARNAT durante el mismo periodo (CONAFOR, 2017).

El estado de Michoacán tiene más de 3 millones de ha forestales equivalentes al 61% de su territorio, de las cuales 1,124,973 corresponden a bosques templados (COFOM, 2007). La región templada del estado es considerada prioritaria para la atención del Programa de Intervención Institucional de Plantaciones Forestales Comerciales (CONAFOR, 2017).

1.2.2. Manejo forestal en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan, Parangaricutiro, Michoacán (CINSP).

Desde su consolidación en 1982 la CINSP, se ha dedicado a la extracción sostenible de madera, mediante planes de manejo y aprovechamiento forestal. En 1984, la comunidad recibió el Premio al Mérito Nacional Forestal por ser un ejemplo de organización comunitaria y de participación en el manejo sostenible de los bosques. En 1986, se firmó el Convenio sobre la Coordinación, Consulta y Gestión Compartida de los Servicios Técnicos Forestales. En el año 1999 obtuvo la certificación de Forest Stewardship Council (FSC) por sus prácticas de manejo forestal. La empresa comunal se encuentra activa en más de veinte áreas de producción, la mayoría están enfocadas en productos forestales no maderables. La CINSP es una empresa de propiedad comunal que tiene su propio Departamento de Servicios Técnicos Forestales en Michoacán, lo cual asegura que la empresa es capaz de desarrollar planes de manejo forestal alineados y armonizados con la Ley Forestal de México (UNDP, 2012).

La vegetación dominante de la comunidad corresponde a bosques de pino-encino, donde más de 10,880 hectáreas se asignan a la silvicultura, 1, 200 hectáreas para plantaciones forestales y viveros. Los bosques naturales se manejan con el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), y la cosecha anual de madera es de 65, 000 m³ (UNDP, 2012; Velázquez et al., 2015). Para las PFC, la información del crecimiento y rendimiento es limitada.

La empresa comunal está basada en una organización consolidada, con un aprovechamiento eficiente de los recursos forestales, además de ser una industria competitiva que genera beneficios socioeconómicos significativos para los miembros de la comunidad (CONAFOR, 2017). El éxito en el manejo del recurso forestal de la CINSJP es trascendente,

por ello se ha convertido en un ejemplo nacional e internacional (Sandoval-García et al., 2015).

1.3 Justificación

Pinus pseudostrobus es una de especies de amplia distribución en el centro de México y particularmente en Michoacán (Eguiluz Piedra, 1978; Muñoz-Flores et al., 2011), por lo que los estudios de cuantificación de biomasa y CO₂ en los bosques en donde se localiza esta especie de manera natural, no sólo tienen un valor científico, sino también potencialmente económico y social, sobre todo si se realiza a través de métodos confiables de estimación de volumen, biomasa aérea y contenido de carbono, que permitirán aplicar posteriormente a programas de Pago por Servicios Ambientales (PSA).

La estimación de volumen es un elemento esencial, tanto para bosques naturales, como para bosques de PFC, ya que de ello depende el desarrollo de los planes de manejo forestal con fines de aprovechamiento o de conservación y protección de los recursos del bosque. Por esto, se debe elegir cuidadosamente la metodología que mejor precisión tenga en sus resultados finales y de los cuales se pueda generar un modelo de estimación de volumen específico, tanto para la región como para la especie evaluada, de ahí que en este estudio se decidió, incluir la edad de la plantación, para obtener resultados más precisos, que otorguen mayor confiabilidad en las estimaciones de volumen y que estos valores, puedan ser utilizados en otros temas aparte del aprovechamiento forestal, como son; biomasa y carbono contenido, inventarios forestales de monitoreo, planes de ordenación forestal y territorial, proyectos de REDD (reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y degradación de los bosques en los países en desarrollo) y REDD+ (conservación, gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas forestales de carbono).

Así mismo, los estudios de estimación de contenido de biomasa y captura de carbono, permiten tener una política ambiental más clara y con lineamientos más precisos en el campo forestal, que conlleven a realizar un manejo adecuado y racional de los recursos naturales (Ordóñez Díaz et al., 2015). Es por esto que, la posibilidad de realizar estudios de seguimiento sobre biomasa y CO₂ de la especie *Pinus pseudostrobus* desde su

establecimiento en plantaciones, hasta su desarrollo como individuos adultos, podría sugerir la selección de ciertos individuos, de manera temprana, con genotipos valiosos y características deseadas, lo que permitiría plantear lineamientos de manejo integral que posteriormente puedan ser aplicados a otras especies dominantes en los bosques mexicanos. De esta manera, generar información más detallada sobre secuestro de CO₂ y caracterizaciones forestales, que brinden herramientas de fácil uso, como modelos de ecuaciones matemáticas con una precisión por encima del 85%, que pueden contribuir a mejorar la información que se tiene sobre los recursos forestales y aportar a la generación de políticas de manejo forestal sustentable orientadas a controlar la emisión de GEI.

1.4 Preguntas de investigación

La pregunta central de esta investigación es conocer ¿Cómo el factor de forma, el volumen y la biomasa almacenada de individuos de *Pinus pseudostrobus*, varían en función de la edad de la plantación? Para esto se estudiaron plantaciones forestales comerciales de diferentes edades que incluyen 10, 15 y 20 años. Además, se exploran cinco modelos matemáticos y se comparan las estimaciones de volumen y biomasa incluyendo todas las edades y por separado para cada edad con el fin de identificar el mejor modelo.

Hipótesis

La hipótesis de esta tesis se centra en probar que individuos de *Pinus pseudostrobus* dentro de la misma clase de diámetro, tendrán diferentes estimaciones de volumen y biomasa, debido a la edad de la plantación. Además, se espera que modelos específicos que consideren la edad estimen con mayor precisión el volumen y la biomasa comparados con un modelo general que considera todas las edades presentes en las plantaciones.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la variación del volumen y el contenido de carbono en biomasa aérea, estimada a través de la obtención de ecuaciones alométricas, con base en plantaciones forestales comerciales de distintas edades en *Pinus pseudostrobus*.

1.5.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta tesis se abordan en dos diferentes capítulos:

El primer objetivo se centra en obtener el factor de forma, así como las ecuaciones alométricas para estimar volumen en plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus*. Posteriormente se comparan diferentes modelos matemáticos que consideran la edad.

El segundo objetivo se basa en obtener la biomasa y una estimación del carbono contenido en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* de diferentes edades utilizando cinco diferentes modelos matemáticos.

1.6 Área de estudio

El estudio se realizó en PFC de *P. pseudostrobus* establecidas en la CINSP, la cual posee una superficie de 18,138 ha y se localiza en la región centro occidente del estado de Michoacán entre 19°34'-19°25' N y 102°17'-102°00' O (García et al., 2016). La superficie de las PFC es de 12000 has y se distribuyen en las localidades de Pario, Huerekutini, Tejamanil I y Tejamanil II.

La cadena montañosa que atraviesa la comunidad forma parte del Eje Volcánico Transversal, presenta pendientes del 5 al 80%, y está constituida por lomeríos y laderas muy pronunciadas. Dentro de las principales elevaciones destacan el cerro Prieto (2300 m.s.n.m.) y el cerro del Pario (2 910 m.s.n.m.). El clima es templado húmedo de tipo C(w2), la temperatura media anual es de 18 °C, en el mes más frío oscila entre -3 y 15.2 °C, con precipitación media anual de 1,600 mm (García-Ruiz, 1988). La mayoría de los suelos son profundos formados por una capa de arena volcánica. Los tipos de suelos más abundantes son andosol húmico de textura mediana, andosol ócrico de textura gruesa, regosol dístrico de textura gruesa y faeozem háplico de textura mediana. Los principales tipos de vegetación son: bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de pino-oyamel y bosque mesófilo de montaña (Figura 1.1). En el componente arbóreo destacan: *Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. leiophylla* Schl. & Cham., *P. michoacana* Martínez., *P. douglasiana* Martínez, *Abies religiosa* (HBK) Schltdl. & Cham., *Quercus rugosa* Née., *Q. obtusata* Humb. & Bonpl., *Q. laurina* Humb. & Bonpl., *Q. castanea* Née., *Q. candicans* Née, *Q. dysophylla* Benth., *Alnus jorullensis* subsp. *Lutea* Furlow. y *Tilia mexicana* Schltdl. (Bello-González et al., 2015; García et al., 2016).

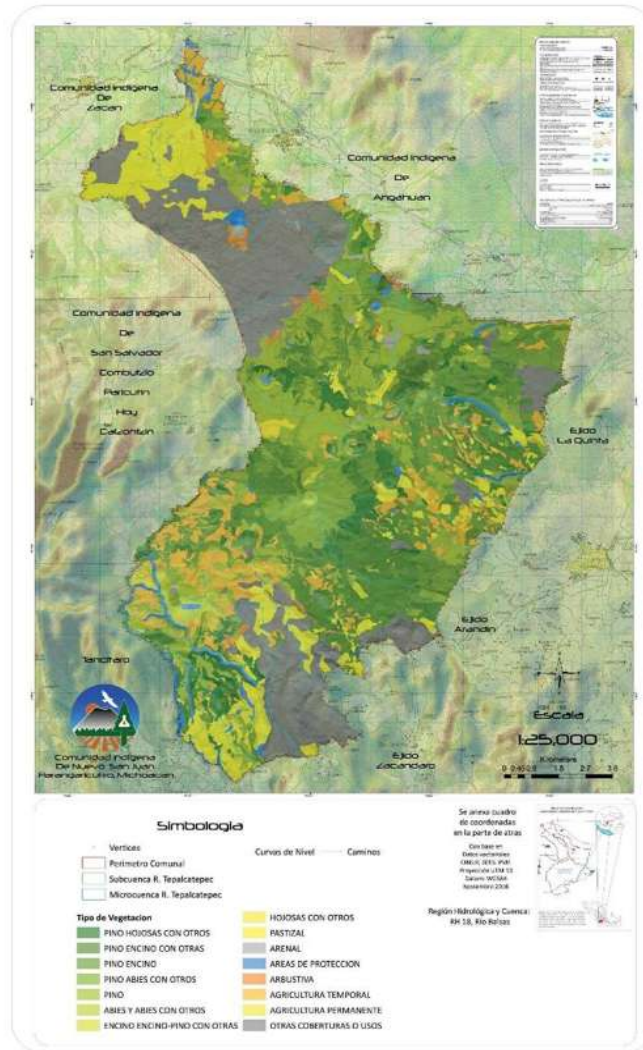


Figura 1.1 Mapa de vegetación de la CINSP. Fuente: CINSP 2018

1.7 Métodos generales

Para la realización de este estudio se utilizaron muestreos destructivos y no destructivos en plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* de diferentes edades. En cada uno de estos métodos se utilizaron diferentes tamaños de muestra: 55 individuos para el primero y 110 para el segundo método. Las plantaciones se encuentran en tres localidades de estudio: Tazaman (10 años), El Tejamanil I (15 años) and El Tejamanil II (20 años). A cada árbol se le tomaron 12 diámetros a diferentes alturas, incluyendo en diámetro normal (DN),

así como también la altura total (H), altura comercial (Hc) y largo de sección (L), además se tomaron datos de número de ramas y su tamaño, peso del fuste, ramas y hojas.

1.8 Variables de medición en árboles

Las variables que se requieren para la generación de planes de manejo forestal, bienes y servicios del bosque, dinámica de ecosistemas boscosos y obtención de biomasa y carbono, están en principalmente función del diámetro y la altura. Las mediciones de DN y H en los árboles pueden hacerse de forma directa, con procedimientos sencillos, pero en algunos casos, cuando las alturas son no tan accesibles se requiere conocimiento de ciertos instrumentos sofisticados como el uso de un clinómetro o un relascopio, que ayuden a medir estas variables en diferentes secciones del fuste. Sin embargo, no siempre es posible medir algunas dimensiones y en otros casos es más costoso medirlas que calcularlas y por lo tanto sólo se teorizan mediante procedimientos matemáticos, cuando presentan este grado de dificultad en su obtención (Cancino, 2012). Entonces las variables más importantes son el diámetro, siendo el más utilizado el DN (sin embargo, en algunos casos también se miden el diámetro basal, diámetros medios y diámetros extremos) y altura (altura fustal, altura comercial, altura de tocón, altura de copa viva), son las responsables de la obtención de los productos de volumen, factor de forma, biomasa y carbono.

1.8.1 Diámetro Normal (DN)

El DN es la variable que habitualmente se mide en ciencias forestales, principalmente porque es la dimensión más fácil de medir en los árboles; es sensitiva a los cambios ambientales y a la densidad del rodal y está relacionada con la altura total, el volumen del fuste, la biomasa del árbol, el tamaño de la copa y la edad del árbol, variables importantes y de difícil medición directa en árboles en pie (Cancino, 2012).

La altura de medición del DN varía en las diferentes regiones del mundo. Así, por ejemplo, en Europa, Canadá, Reino Unido, Australia y Sudamérica, entre otros, el DN se mide a una altura de 1,30 m desde el nivel del suelo, en cambio, en Estados Unidos, la medición se realiza a 4,5 pies, esto es aproximadamente a 1,37 m de altura. Esa variabilidad

en la altura debe tenerse presente en el momento de comparar variables que involucren el DN en su determinación y hayan sido obtenidas en regiones que difieren en la altura de medición del DN (Cancino, 2012).

1.8.2 Mediciones del DN en diferentes tipos de terrenos

De acuerdo con Cancino (2012) y (Prodan et al., 1997), la medición del DN a una altura de 1,30 m desde suelo se debe realizar como se indica en la Figura 1.2.

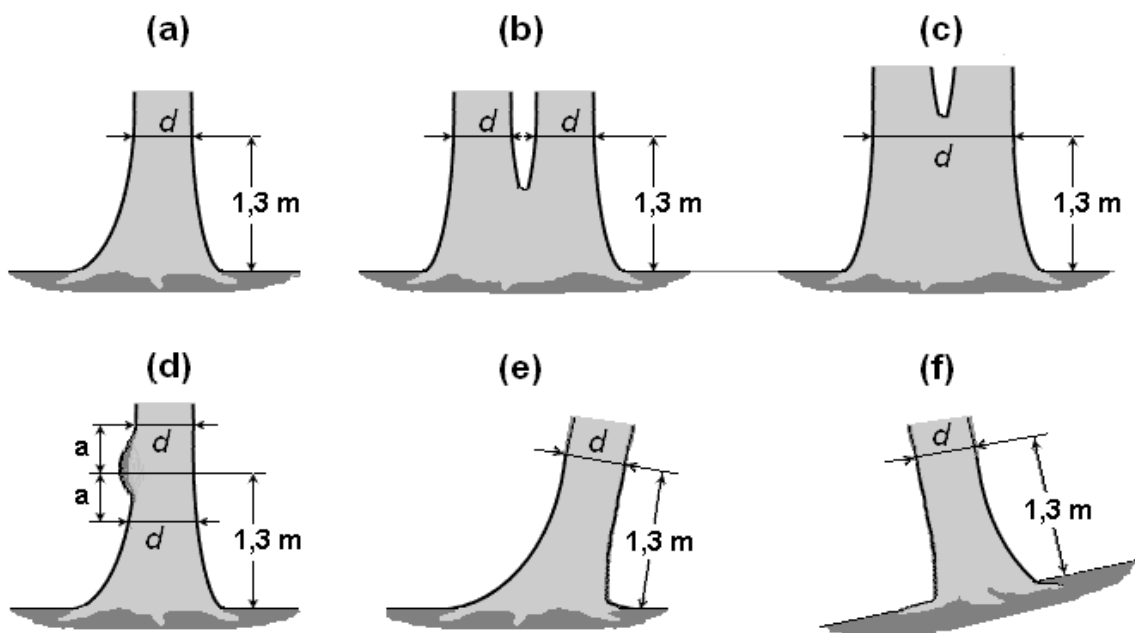


Figura 1.2 Definición de la altura de medición del DN en (a) arboles rectos, normales y terreno bajo 1,3 m de altura en el fuste; (c) arboles bifurcados sobre 1,3; (d) árbol defectuoso a la altura de 1,3 m; (e) arboles inclinados; (f) en terreno con pendiente. Fuente: (Cancino, 2012).

1.8.3 Medición de alturas

La altura es la longitud de la línea recta que va desde el suelo (base del fuste) hasta algún punto a lo largo del árbol, dependiendo de la posición en que se encuentre ese punto. Según Cancino (2012), se definen cinco alturas diferentes:

- i) *Altura total*, medida entre el suelo y el extremo de la yema terminal del fuste (ápice).

- ii) *Altura fustal*, medida entre el suelo y el punto donde comienza la copa (viva o muerta) del árbol.

- iii) *Altura comercial*, medida entre el suelo y el punto donde el fuste tiene un diámetro comercial definido.

- iv) *Altura de tocón*, medida entre el suelo y la base del primer trozo.

- v) *Altura de copa viva*, medida entre el suelo y el inicio de la copa viva. Después del DN, la altura es la variable más medida en los árboles.

La altura se utiliza para caracterizar un rodal, estimar el volumen o determinar la calidad de sitio. También se utiliza para clasificar árboles; por ejemplo, la clasificación de Kraft define cinco categorías de árboles según su altura y posición relativa: dominante, codominante, intermedio, suprimido y muerto; esta clasificación puede tomarse como base para objetivos de manejo silvícola (Cancino, 2012; Prodan et al., 1997).

La medición en árboles de altura pequeña (menor a 15 m) puede realizarse directamente, mediante cintas métricas o varas telescópicas. La medición en árboles grandes se realiza indirectamente, mediante instrumentos ópticos denominados hipsómetros. Estos miden alturas en base a relaciones entre lados de triángulos semejantes (*hipsómetros Christen y Merritt*) o bien, en base a tangentes de ángulos (*hipsómetros Haga, Blume-Leissy Suunto*). Para realizar la medición, el operario se posiciona a cierta distancia del árbol, apunta con el instrumento a la base y a otro punto de interés en el árbol, y realiza la lectura en la escala del instrumento en cada oportunidad. Considerando los valores sobre la horizontal como positivos y aquellos bajo la horizontal como negativos, el valor absoluto de la diferencia entre ambas mediciones entrega la altura buscada (Prodan et al., 1997).

1.9 Volumen de fustes (Métodos seccionales)

Las estimaciones de volumen mediante métodos seccionales han sido lo más utilizado durante los últimos 200 años, convirtiéndose de esta forma en teoría clásica. En el desarrollo de este estudio, se utilizaron los métodos de Cono truncado y de Newton, los cuales se pueden observar en los resultados de los capítulos II y III, así como en Dávila et al. (2022).

El volumen ha sido y sigue siendo la forma de expresión de la cantidad de madera, contenida en árboles y rodales, más ampliamente utilizada a escala mundial. Tratándose del volumen total de madera contenido en un rodal, el mismo puede considerarse como la suma de los volúmenes de los árboles en pie comprendidos en él. En consecuencia, la forma de acceder a su conocimiento es por medio de la estimación del volumen de sus árboles individuales (Prodan et al., 1997). En el área forestal, a este procedimiento se le denomina cubicación.

En las teorías clásicas de las ciencias forestales se conocen y se aplican a nivel académico y a nivel comercial, las siguientes fórmulas, que aún en los métodos de cubicación de las teorías modernas, se utilizan como base para la generación de modelos volumétricos y de ahusamiento (Romahn & Ramírez, 2010).

- Smalian: $V_S = \frac{L}{2}(S_0 + S_l)$
- Huber: $V_H = S_m * L$
- Newton: $V_N = \frac{L}{6}(S_0 + 4S_m + S_l)$
- Cono truncado: $V_{Tc} = \frac{L}{3}(S_0 + S_l + \sqrt{S_0 S_l})$
- Neiloide truncado: $V_{Tn} = \frac{L}{4}[S_0 + S_l + \sqrt[3]{S_0 S_l}(\sqrt[3]{S_0} + \sqrt[3]{S_l})]$

Donde,

V = Volumen.

L = Longitud del fuste o troza.

S_0 y S_1 = Áreas de las secciones transversales extremas, mayor y menor, del fuste o troza, respectivamente.

S_m = Área de la sección transversal media del fuste o troza

1.10 Factor de forma

Existen diferentes métodos para determinar el factor de forma de los árboles, basándose generalmente en uno de los tres tipos de FF (Absoluto, artificial o natural). En este estudio se utilizó el FF natural o verdadero ($F_{0.1H}$) de Hohenadl, para estimar los valores de volumen de forma más real, como se puede observar en los resultados obtenidos en los posteriores capítulos del presente trabajo.

De acuerdo con Cancino (2012), el factor de forma se obtiene del coeficiente entre el volumen real del árbol y el volumen de un cuerpo geométrico de referencia, cuyas dimensiones corresponden a las dimensiones generales del árbol (DN, altura). Al volumen del sólido de referencia también se le denomina volumen aparente.

$$F = \frac{V_r}{V_s}$$

Donde,

F es el factor de forma.

V_r es el volumen real del fuste.

V_s es el volumen del sólido de referencia.

Cuando el sólido de referencia es un cilindro $V_s = g * h$, en donde g = área basal y h = altura. Como en los factores de forma que se definen a continuación.

1.10.1 Factor de forma absoluto

El factor de forma correspondiente al diámetro medido en la base del fuste recibe el nombre de *factor de forma absoluto*. De acuerdo con la fórmula anterior,

$$F_0 = \frac{V_r}{g_0 * H}$$

Donde,

F_0 es el factor de forma relativo a la base del fuste (0% de la altura total del fuste).

g_0 es el área de sección transversal fustal en la base.

H es la altura total del árbol.

1.10.2 Factor de forma artificial o falso

Puede ocurrir que dos árboles con igual factor de forma no posean igual forma. Este factor de forma recibe el nombre de *factor de forma artificial*, quedando definido de la siguiente manera cuando el sólido de referencia es un cilindro (note que el volumen del cilindro en este caso es $V_s = g \cdot H$) (Cancino, 2012).

$$F_{1.3} = \frac{V_r}{g_{1.3} * H}$$

Donde,

$F_{1.3}$ es el factor de forma desde el DN (diámetro a la altura del pecho).

$g_{1.3}$ es el área de sección transversal a la altura del pecho o normal del fuste.

H es la altura total del árbol (m).

1.10.3 Factor de forma natural, verdadero

La influencia del tamaño del árbol sobre el factor de forma se elimina midiendo el diámetro para el sólido de referencia a un porcentaje de la altura total del árbol. Así, el diámetro se obtiene a la misma altura relativa en árboles de diferente altura. El factor de forma correspondiente al diámetro medido a una altura del 10% de la altura total y utilizando el método de Huber para estimar volúmenes seccionales, recibe el nombre de *factor de forma*

natural o de Hohenadl. El factor de forma natural cilíndrico se obtiene de la relación siguiente (note que el volumen del cilindro en este caso es $V_s = g_{0,1} H$). (Prodan et al., 1997).

$$F_{0,1H} = \frac{V_r}{g_{0,1} * H}$$

Donde,

$F_{0,1H}$ es el factor de forma al 10% de la altura total del fuste.

$g_{0,1}$ es el área de sección transversal fustal a un décimo de la altura total,

H es la altura total del árbol.

En términos de los diámetros a diferentes alturas relativas, el factor de forma de Hohenadl se expresa como (Cruz De León et al., 2016; Prodan et al., 1997):

$$0.2 * \left(1 + \left(\frac{d_{0,3}^2}{d_{0,1}^2} \right) + \left(\frac{d_{0,5}^2}{d_{0,1}^2} \right) + \left(\frac{d_{0,7}^2}{d_{0,1}^2} \right) + \left(\frac{d_{0,9}^2}{d_{0,1}^2} \right) \right) = f_{0,1}$$

En particular, esta última fórmula es la que se utilizó en los cálculos de este trabajo. El factor de forma natural toma valores que oscilan entre 0,3 y 0,6. Los sólidos geométricos básicos presentan valores de factor de forma natural entre 0,34 y 0,56 (paraboloide: 0,56; cono: 0,41; neiloide: 0,34) (Prodan et al., 1997).

1.11 Biomasa

La biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo de la superficie del suelo. Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco o a través de valores modulares por clases diamétricas. La estimación de la biomasa arbórea es importante para conocer la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los sistemas forestales. Existen varios métodos de estimación de la biomasa (Gómez-García et al., 2013), por ejemplo, el método del árbol medio, el de corta, el del análisis dimensional y alométrico

o el método múltiple de muestreo. Son muchas las combinaciones y procedimientos para obtener la biomasa de árboles individuales y masas forestales. El método de muestreo más generalizado consiste en cortar, trocear y pesar por separado todas las fracciones de un árbol. Estudios recientes demuestran que estos métodos tienden a obtener valores sesgados de los pesos de las diferentes fracciones por lo que, en el caso de que se necesite mucha precisión en las estimaciones, es necesario emplear métodos más específicos como los denominados «randomized branch sampling» o «important sampling» (Valentine et al., 1984), consistentes en elegir un camino de muestreo a lo largo del árbol, desde la base hasta una ramilla terminal, eligiendo aleatoriamente una rama en cada bifurcación, y asignándole una probabilidad de selección. Se pesan las fracciones seleccionadas y se estima el peso total del árbol. Otros autores se basan en estimaciones de la biomasa de las ramas para calcular la total del árbol (Grote, 2002). Una vez conocidos los pesos de las distintas fracciones es necesario ajustar un modelo matemático que relacione los pesos de biomasa seca con una o más variables representativas de estos árboles.

En el presente estudio para la estimación de biomasa aérea y contenido carbono, se tomaron datos provenientes de muestreos destructivos, seccionando el fuste en trozas, deshojando las ramas que fueron categorizadas en grandes, medianas y pequeñas, para posteriormente pesar cada uno de los componentes del árbol y llevar a laboratorio de secado las muestras tomadas de cada componente. Después de calcular volumen, factor de forma, biomasa aérea y contenido de carbono, se evaluaron diferentes modelos matemáticos, para la estimación de estos parámetros, en cada una de las edades, con el fin de definir cuál de estos modelos, es el más adecuado para su posterior uso.

1.12 Referencias.

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Azures, F., & Gómez-Villegas, R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529-543. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000400005&script=sci_arttext
- Avendaño Hernandez, D. M., Mireles, M. A., Anzures, F. C., & Etchevers Barra, J. D. (2009). Biomass and carbon estimation in an *Abies religiosa* forest. *Ensayo Científico Fitotec. Mex*, 32(3), 233–238.
- Bello-González, M. Á., Hernández-Muñoz, S., Lara-Chávez, B. N., & Salgado-Garciglia, R. (2015). Redalyc. Plantas útiles de la comunidad indígena nuevo san juan parangaricutiro, michoacán, México. *Polibotánica*, 39, 175–215. <https://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n39/n39a10.pdf>
- Boca, T., Fassola, H., Crechi, E., Barth, S., Keller, A., Winck, R., & Ferrere, P. (2017). Modelos aditivos de predicción de biomasa aérea de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de Misiones Argentina Additive models for predicting biomass of *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in Misiones Argentina. *Quebracho*, 25(1,2), 5–15.
- Brown, A. D., & Kappelle, M. (2001). Introducción a los bosques nublados del neotrópico: una síntesis regional. *Bosques Nublados Del Neotropico*, 25–40.
- Caballero-Miranda, M. L. (2017). Impactos del aprovechamiento forestal en la estructura y composición florística del bosque productivo de la comunidad nativa chamiriari, satipo. *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 1–125. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/2937/F70-C32-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Vargas-Hernández, J. J., Sánchez-Vargas, N. M., & Sáenz-Romero, C. (2013). Estrategias de crecimiento y distribución de biomasa en *Pinus pseudostrobus* bajo diferentes condiciones de competencia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 71-79. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000100008
- Cancino, J. O. (2012). *Dendrometría básica* (Universidad de Concepción, Ed.). Departamento de Bosques y Medio Ambiente.
- Carrillo Anzures, F., Acosta Mireles, M., Jiménez Cruz, C., González Molina, L., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México* Allometric equations for estimating biomass and carbon from the aerial part of *Pinus hartwegii* in Ixta-Popo National

- Park, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 681–691. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n3/2007-0934-remexca-7-03-681-en.pdf>
- CEPAL. (2021). *La pérdida de los bosques de América Latina y el Caribe 1990–2020: evidencia estadística*. Comisión Económica Para América Latina y El Caribe. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47151>
- Chazdon, R. L., Brancalion, P. H. S., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., Moll-Rocek, J., Céilia, I., Vieira, G., & Wilson, S. J. (2016). When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. *Ambio*, 45, 538–550. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0772-y>
- COFOM. (2007). *Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de Michoacán 2030*. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/12/182Programa%20Estrat%C3%A9gi%20Forestal%20del%20Estado%20de%20Michoacan%20Tom%20I.pdf>
- CONAFOR. (2017). *Programa Anual de Trabajo 2017*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/201111/Programa_Anual_de_Trabajo_2017.pdf
- Cruz De León, G., Alfaro-Trujillo, I., & Bañuelos-Jiménez, M. (2016). *Error predictions for average end diameter sectional formula in tree stem volume measurement Predicciones de error para la fórmula seccional del promedio de diámetros extremos en la medición del volumen de tronco de árbol*. 37(1), 211–215. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100020>
- Cruz de León, G., Cruz de León, J., Cruz de León, G., & Cruz de León, J. (2006). The segmental conic model for forest measurements. *Madera y Bosques*, 12(2), 91–96. <https://doi.org/10.21829/MYB.2006.1221245>
- D'Amato, D., Rekola, M., Wan, M., Cai, D., & Toppinen, A. (2017). Effects of industrial plantations on ecosystem services and livelihoods: Perspectives of rural communities in China. *Land Use Policy*, 63, 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.01.044>
- Dávila-Molina, D. E., Sáenz-Romero, C., Aguirre-Calderón, O. A., & Lopez-Toledo, L. (2022). Age Contributes to Volume Estimation and Form Factor of *Pinus Pseudostrobus* Lindley in Commercial Forest Plantations from Western Mexico. *Journal of Sustainable Forestry*, 42(3), 336-351.
- de Díaz-Ríos, M. J., Vázquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M., Sánchez Vélez, A., Lara Bueno, A., & Cruz León, A. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo* Allometric equations for estimating biomass and carbon alder obtained by a nondestructive method. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16, 3235–3249. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3235-en.pdf>

- Dixon, R. K., Winjum, J. K., Andrasko, K. J., Lee, J. J., & Schroeder, P. E. (1994). Integrated land-use systems: Assessment of promising agroforest and alternative land-use practices to enhance carbon conservation and sequestration. *Climatic Change* 1994 27(1), 71–92. <https://doi.org/10.1007/BF01098474>
- Eguiluz Piedra, T. (1978). *Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género Pinus en México*. Universidad Autónoma de Chapingo. Tesis de licenciatura.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations - (FAO). (2006). The State of Food and Agriculture, Food aid for Food Security. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 43. <https://www.fao.org/3/a0800e/a0800e.pdf>
- FAO. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010 - Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/e4fa9d60-5207-5a96-976c-cd2e6f3519a5/>
- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 Principales resultados*. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>
- García, G. G., García-Magaña, J., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, J., & García-Cuevas, H. (2016). Precisión de los coeficientes y cocientes de forma en la estimación del volumen de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7, 19–36. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63448564003>
- García-Ruiz, J. M. (1988). La evolución de la agricultura de montaña y sus efectos sobre la dinámica del paisaje. *Revista de Estudios Agro-Sociales*, 146, 8–37. <https://www.researchgate.net/publication/28133568>
- Garcidueñas Martínez, A. P. (1987). *[Biomass production and nutrimental accumulation in a Pinus montezumae Lamb. area]*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. Centro de Genética. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MX8920131>
- Gómez-García, E., Crecente-Campo, F., & Diéguez-Aranda, U. (2013). Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noroeste de España. *Madera y Bosques*, 19(1), 71–91. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000100006
- Grote, R. (2002). Foliage and Branch Biomass Estimation of Coniferous and Deciduous Tree Species. *Silva Fennica*, 36(4), 779–788. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.497.3805&rep=rep1&type=pdf>
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007 Equipo de redacción principal Equipo de redacción principal OMM PNUMA. IPCC, 1–104. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Kanninen, M. (2010). Plantation forests: global perspectives. *Earth Ecosystem Goods*, 1–15. https://tuhat.helsinki.fi/ws/portalfiles/portal/87137209/Kanninen_2010_Plantation_forests_global_perspectives_Chapter_1_In_Bauhus_et_al._book.pdf

- Köhl, M., Neupane, P. R., & Lotfiomran, N. (2017). The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname. *PLoS ONE*, 12(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181187>
- Martínez-Gordillo, M., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M. D. R., & Montiel, O. (2013). Géneros de Lamiaceae de México, diversidad y endemismo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(1), 30–86. <https://doi.org/10.7550/RMB.30158>
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. A., & Nájera-Luna, A. (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*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000400007
- Muñoz-Flores, J. H., Sáenz-Reyes, J. T., García-Sánchez, J. J., Hernández-Máximo, E., & Anguiano-Contreras, J. (2011). Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), 29-44. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000300004&script=sci_arttext
- Nájera-Luna, J. A. (1999). Ecuaciones para estimar Biomasa, Volumen y Crecimiento en Biomasa. *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales*, 1–111. <http://eprints.uanl.mx/7669/1/1020130186.PDF>
- Ordóñez Díaz, A. J., Rivera Vázquez, B. E., Medina Tapia, E. M., & Hernández Ahedo R. L. (2015). Carbon content and its potential sequestration in the forest biomass of San Pedro Jacuaro, Michoacán State. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7–16. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000600007&script=sci_arttext&tlng=en
- Ordóñez, J. A., Jong, B. H. J. de, & Masera, O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2), 27–47. <https://doi.org/10.21829/MYB.2001.721310>
- Ostadhashemi, R., Rostami Shahraji, T., Roehle, H., & Mohammadi Limaiei, S. (2014). Estimation of biomass and carbon storage of tree plantations in northern Iran. *Journal of Forest Science*, 60(9), 363–371. https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/55_2014-JFS.pdf
- PNUMA, P. de las N. U. para el M. A. O. R. para A. L. y el C. (2007). *Informe Final del Foro Regional del PNUMA para la Sociedad Civil de América Latina y el Caribe*. http://www.pnuma.org/forodeministros/16-repdominicana/rde07rfe_InformeSociedadCivil_07Dic2007.pdf
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal*. San José: IICA-GTZ. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0BfaTECpREEC&oi=fnd&pg=PA2&dq=me>

[nsura+forestal&ots=gfFOdceJxk&sig=FfQyo6gMoRwOFMV2qjpAQIID67s#v=onepage&q=mensura%20forestal&f=false](#)

- Ripple, W., Wolf, C., Newsome, T., Barnard, P., Moomaw, W., & Grandcolas, P. (2019). World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, 70(1) 8–12.
- Rodríguez-Ortiz, G., Aragón-Peralta, R. D., Enríquez-del Valle, J. R., Hernández-Hernández, A., Santiago-García, W., & Campos-Angeles, G. v. (2020). Calidad de plántula de progenies selectas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* del sur de México. *Interciencia*, 45(2), 96–101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33962521007>
- Romahn, C. F., & Ramírez, H. (2010). *Dendrometría* (Universidad Autónoma de Chapingo, Ed.). División de Ciencias Forestales. <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Rufi'ie, Hergoualch, K., & Verchot, L. (2013). Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 307, 219–225. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.013>
- Sandoval-García, R., González-Cubas, R., & Bautista-Cruz, A. (2015). *Consideraciones sobre aspectos ecológicos y estatus de conservación de Pinguicula jackii subsp. jackii (Lentibulariaceae), especie amenazada del centro-sur de Cuba*. <https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1627>
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. *Universidad Austral De Chile*, 1(1), 1–17. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Manual_de_procedimiento_para_inventarios_de_carbono_en_ecosistemas_forestales.pdf
- Vashum, K. T. (2012). Methods to Estimate Above-Ground Biomass and Carbon Stock in Natural Forests - A Review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 02(04). <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000116>
- Torres R. M., & Guevara S. A. (2002). *40 Gaceta ecológica el potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico*.
- UNDP. (2012). *DOWN TO EARTH: Territorial Approach to Climate Change Green, Low-Emission and Climate-Resilient Development Strategies at the Sub-national Level*.
- Valentine, H. T., Tritton, L. M., & Furnival, G. M. (1984). Subsampling Trees for Biomass, Volume, or Mineral Content. *Forest Science*, 30(3), 673–681. <https://doi.org/10.1093/FORRESTSCIENCE/30.3.673>
- Velázquez, A., Bocco, G., Torres, A., Lopez, A. C., & Gómez, F. A. (2015). Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, Mexico. *Forest Plans of North America*, 169–175. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799936-4.00020-5>

- West, P. W. (2009). Measurements. *Tree and Forest Measurement*, 5–10.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-95966-3_2
- Woodall, C. W., Heath, L. S., Domke, G. M., & Nichols, M. C. (2010). *United States Department of Agriculture Methods and Equations for Estimating Aboveground Volume, Biomass, and Carbon for Trees in the*. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-88>

**2. CAPITULO II: La edad contribuye a la estimación del volumen y factor de forma
de *Pinus pseudostrobus* Lindley en plantaciones forestales comerciales del
occidente de México**

Age Contributes to Volume Estimation and Form Factor of *Pinus pseudostrobus* Lindley in Commercial Forest Plantations from Western Mexico

David E. Dávila-Molina^a, Cuauhtémoc Sáenz-Romero^b, Oscar Alberto Aguirre-Calderón^c, Leonel Lopez-Toledo^{b*}

^a Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas (PIDCB) option: Ciencias Agropecuarias, Forestales y Ambientales, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México; ^bInstituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México; ^cFacultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N. L, México.

*Corresponding author: llopezt@umich.mx

Contribution by author

David Eduardo Dávila Molina: study design and planning, data collection, data processing, writing, analysis and interpretation; Cuauhtémoc Sáenz-Romero: structure and revision of the document; Leonel Lopez-Toledo: statistical advice, writing and structure of the document, Oscar Aguirre Calderón: advice on field work and document review.

Age Contributes to Volume Estimation and Form Factor of *Pinus pseudostrabus* Lindley in Commercial Forest Plantations from Western Mexico

Abstract

*Sectional equations and mathematical volume models are a reliable way to estimate carbon sequestration and storage, which is a key foundation for forest management and conservation. The objective of this study was to assess stem volume and form factor through the classical sectional method to then, using five regression models commonly used for forest management, identify the most suitable mathematical model to estimate the stem volume in a commercial forest plantation (CFP) of *Pinus pseudostrabus* Lindley in the Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, in Western Mexico. By using 10, 15 and 20 yr.-old sampling points and two sampling methods (destructive and non-destructive), we found a form factor 0.42, 0.48 and 0.51 and stem volume of 0.098 m³, 0.400 m³ and 0.804 m³ for the three ages assessed, which presented diameter classes (DC), from 10 to 45 cm. The mathematical models identified that age of plantation determines stem volume and form factor, and the models that best fit volume estimation were the Schumacher-Hall model and the Australian model with an R^2_{adj} range between 0.89 and 0.99. Estimation of stem volume is of vital importance to assess the income generated by the timber industry, and relevant for forest conservation, management and carbon sequestration studies.*

Keywords: mathematical models, forest age, form factor, *Pinus pseudostrabus*

• **Introduction**

For natural forests and plantation management, conservation plans or timber harvesting, obtaining the volume of tree trunks is important to estimate the amount of existing and usable timber in a forest. It is crucial in forest measurements to estimate growth and biomass based on stem volume, as well as in those studies that seek to explore the forest role in carbon sequestration and storage and ensure the sustainable use of natural resources (de Eugenio et

al., 2018; Wegiel & Polowy, 2020).

There are different methods to quantify the stem volume, such as sectional methods, methods based on volume equations and those using the profile or taper functions, which is called as classical theory (Corral-Rivas et al., 2017; Dávila et al., 2012). The sectional methods use a geometric adjustment variable for the cylinder as the general reference solid. This variable is called as the *form factor*, which is a correction factor to consider the tree form and the taper along the stem (Coronel Toro, 2019; Dávila Molina, 2017). The sectional methods determine the form factor of a tree stem through mechanical theories (Alanís-Rodríguez et al., 2021). These methods assume that the main effect determining the form of a stem is the resistance to the wind and they predict a cubic paraboloid form (Prodan et al., 1997). Another group of theories assumes that the main effect is resistance to its own weight and predicts a neiloid form (Cruz de León et al., 2006; Vásquez-Bautista et al., 2016). Over the past century, extensive work has been conducted in this field and Dean & Long (1986) retrieved the sectional method theories and presented them in a concise and simple way.

The current theory, using mathematical models for calculating the volume of wood in forests, is easier to adjust for different purposes such as timber production and wood conservation (Cancino, 2012) and it is easy-to-use tools that allow to obtain reliable volume values (Rodríguez-Ortiz et al., 2020). These mathematical models use diameter and volume, which present high correlation. However, the volume estimation will depend on the model used (Akossou et al., 2013; Cancino 2012). These tools have been used from the 1970s to the present day, being preferred by timberland companies managing natural forests and commercial forest plantations (CFP), increasing their use in the last ten years for forest

conservation and natural resource management (García et al., 2016; Hernández-Ramos et al., 2018; Ramos et al., 2013).

Currently, there are many mathematical models of volume, both linear and non-linear (Heredia-Acuña et al., 2019; Lana et al., 2015; Prodan et al., 1997). All these models use the classical theory of sectional methods as the basis. For the development of these models, variables such as the normal diameter (ND), total height (H), diameters of ends or middle part of stem section (d) and height of section or log (hoL) are required (Cruz De León et al., 2016; Cruz De León & Uranga-Valencia, 2013; García-Espinoza et al., 2019). Newton's sectional volume method has been catalogued as the most accurate since it has been tested using the Archimedean principle of fluid displacement (Prodan et al., 1997; Riecke, 1849). However, its application is somewhat complex, as it needs to be applied individually, while a mathematical model of volume can be applied directly to any individual or forest stand for which model has been adapted, as well as it can provide a value close to the real one, it does not require a destructive method and its use is more economically efficient (del Río et al., 2015; West, 2009).

Generally, methods to estimate volumes consider diameter classes but not age of the individuals (García et al., 2016). Some form factor studies, such as those developed in commercial forest plantations by Cruz de León et al., (2006); Rodríguez et al., (2020), reported significant differences in form factors among ages. They also found that a single diameter class may consist of different ages due to the presence of suppressed trees. Compared to those volume estimations, which only consider diameter, the methods considering age result in better quantity and quality of wood volume per stem, which influences forest wood volume and timber volume (West, 2009). Therefore, it was identified

that in CFP, it is essential to consider the age of individuals when applying volume models in order to obtain better precision in the estimated values.

In this study, we used *Pinus pseudostrobus* Lindley, commonly called as smooth bark Mexican pine, as our model system to estimate the volume of wood in three different CFP's ages. *P. pseudostrobus* is considered as one of the forest species with the highest commercial value due to its phenotypic characteristics, good resin production and wood (Castellanos-Acuña et al., 2013; García et al., 2016; Hernández-Ramos et al., 2018). In addition, *P. pseudostrobus* is one of the most used species in different silvicultural projects in Mexico due to their ecological association with other 25 and 34 species from the south to the center of Mexico, mainly of the genera *Pinus*, *Quercus* and *Abies*. Specifically, the Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP) located in western Mexico, has developed forest management practices, and turned into a national and international benchmark due to the sustainability and determination of the community to stand out as a timberland company. The CINSJP own natural pine and oak forests, as well as plantations of several pine species, especially *P. pseudostrobus* (Heredia-Acuña et al., 2019).

This study aimed to assess the stem volume and form factor in trees of *P. pseudostrobus* Lindley for three ages: 10, 15 and 20 yr.-old, in CFP in the CINSJP through the classical sectional method to then, using five regression models commonly used for forest management, identify the most suitable mathematical model to estimate the stem volume in a commercial forest plantation (CFP). To do this, we used two types of sampling methods, destructive and non-destructive, which initial volume by sectional methods (classical theory) and a natural form factor ($FF_{0.1H}$) were calculated for each age, to later identify the most suitable volume model among five mathematical models: Schumacher-Hall, Schumacher-

Hall linearized, Spurr - Combined variable, Australian and Thornber. We selected the best models using a weighting table, mainly a higher adjusted coefficient of determination R^2 (R^2_{adj}) and lower coefficient of variation (CV). We specifically asked: 1) the stem volume stored and form factor of *P. pseudostrobus* Lindley in the different sampling points vary according to age? 2) Are there significant differences between destructive and non-destructive sampling to calculate stem volume and form factor? and 3) Is there a general mathematical model for calculating volume for the entire plantation or a specific model for each age of the plantation. We hypothesize that, individuals within the same diameter class (DC), will have different ranges of volume (V) values due to the age in which they are (Talita et al., 2018). Then, we expect that destructive sampling will present better precision than non-destructive sampling, therefore, there will be statistically significant differences between them (Vásquez-Bautista et al., 2016). And finally, we hypothesized that age-specific mathematical volume models are expected to present a better value of estimated V, than an Age General Model (AGM) (Blanco-Flórez et al., 2014; Prodan et al., 1997). Our study shows that obtaining volume values of *P. pseudostrobus* wood in a more confinable, precise and fast way, improves the productive performance in CFPs, which can be applied for forest management, use and conservation plans, as volume is an essential variable for estimating biomass, carbon sequestration and storage contributing to enhancing greenhouse effect and climate change.

Materials and methods

Study area

The present study was conducted in commercial forest plantations (CFP) of the Comunidad

Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP), which has an area of 18,138 ha and it is in the Western of Mexico in the state of Michoacán, between 19° 25'-19° 34 'N and 102° 00'-102° 17' W. The climate is temperate humid type C (w2), and the average annual temperature of the sites where *P. pseudostrobus* is present is 15.2 °C, with an average annual rainfall of 1,125 mm (Sáenz-Romero et al., 2012). The soils are of volcanic origin and the units of Andosol, Regosol and Feozems. The type of dominant forest cover corresponds to a natural association of pine-oak forests, which are under forest management, with the Mexican Method for the Management of Irregular Forests (MMOBI) and the Silvicultural Development Method (MDS); the harvest of annual wood is approximately 65,000 m³ (Velázquez et al., 2015). The most representative tree species are *P. pseudostrobus* Lindl., *Pinus devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. douglasiana* Martínez, *P. leiophylla* Schl. and Cham., *Quercus laurina* Humb et Bonpl., *Q. castanea* Muhl., *Q. rugosa* Neé, *Abies religiosa* Kunth Schltdl. et Cham., *Arbutus xalapensis* Kunth, *Cornus disciflora* Sessé and Moc., *Tilia mexicana* Schltdl., *Alnus acuminata* H.B.K. and *Alnus jorullensis* Humboldt, Bonpland and Kunth (García et al., 2016). Since 1983 the CINSJP has conducted the forest management to obtain sawn wood products such as boards, planks and rollers, for construction and for fine finish products, such as furniture, staves, moldings, floors and constructions. Forest industry, including logging, sawmill, reforestation, furniture production and resin extraction, is the most important economic activity with more than 35% of inhabitants being related to this industry (García-Espinoza et al., 2019).

Study species

Pinus pseudostrobus Lindl. (Pinaceae) is widely distributed throughout highlands from 1600 to 3200 masl in Mexico and Central America in an extensive geographic range (it has been

recorded in 20 of the 32 states of Mexico). In the study area, reproductive individuals can reach up to 40 m in height with very straight stems and up to 100 cm in stem diameter (Morales-Arias et al., 2018; Rodríguez-Ortiz et al., 2020). *P. pseudostrobus* may be found forming pure forest stands or pine-oak mixed forests. Its timber is one of the best qualities for construction and production of pulp for paper, plywood, fine furniture, handicrafts and cabinetmaking. Moreover, it is one of the species with the highest production of resin (Rodríguez-Ortiz et al., 2020). *P. pseudostrobus* is one of the most important timber species in Mexico, and especially in Michoacán. Specifically, the CINJSP uses the species, as the main raw material, for the primary and secondary production of timber products (Velázquez et al., 2015).

Experimental design

We did an exploratory sampling using 10-8 x 20 m transects established randomly at six sampling sites of the commercial forest plantation of the CINSJP. Each sampling site refers to the age of the plantation: 5, 10, 15, 20, 25 and 30 yr. At each sampling site, we measured the normal diameter (ND: diameter of the stem measured at 1.30 m; (Prodan et al., 1997) and total Height (H) of all trees within the transect in order to identify the sample size, which must be at least 30 trees for sampling (Urbano et al., 2018), and diameter classes available (Murrieta et al., 2007). Sampling size and diameter classes were useful to identify the most suitable sampling site to perform this experiment. Therefore, three sampling sites of *P. pseudostrobus* of different ages were selected: Tazaman (10 yr. old), El Tejamanil 1 (15 yr. old) and El Tejamanil 2 (20 yr. old) where we additionally estimated stem volume (Eq. 1) and form factor (Eq. 3) of all trees using two different sampling methods: 1) Destructive and 2) Non-destructive described below.

Sectional methods to estimate volume and form factor

Destructive sampling method. Within the Commercial Forest Plantations (CFP) of CINSJP, we selected 60 trees of 10-45 cm of normal diameter at each sampling site, having commercial features, including straight stems, tall branches and good health status. For the selected trees, we measured basal diameter (BD), normal diameter (ND) and crown diameter (CD) in two directions, commercial height (H_c) and total stem length (H) (Urbano et al., 2018). Later, we felled the selected 60 trees to perform the experiments.

Non-destructive sampling method. This methodology requires the use of an electronic Criterion dendrometer (RD1000). We chose 10 trees for each diameter class (DC) of the selected sampling sites, for a total of 120 *P. pseudostrobus* trees. First, we measured the tree stems from the bottom to the top, following the destructive sampling method, dividing the total height by ten and measuring the diameters with bark of each section. Then, we measured the normal diameter, commercial height, total height and diameter of the crown (Prodan et al., 1997; Rodríguez et al., 2020).

For both the destructive and non-destructive methods, the truncated cone sectional method equation (equation 1) was used to obtain the volume of wood:

$$V_{Tc} = \frac{L}{3} (S_0 + S_l + \sqrt{S_0 S_l}) \quad (1)$$

Where,

V_{Tc} = Truncated cone wood volume.

L = Length of the stem or log.

S_0 and S_1 = Areas of the stem's outer cross-sections (major and minor), respectively.

For the form factor, we used the coefficient between the real volume (V_r) of the tree and the volume of a geometric reference body (V_s ; equation 2; (Cancino, 2012)., whose dimensions correspond to the general dimensions of the tree (ND and height). The volume of the reference solid is also called apparent volume (West, 2009).

$$FF = \frac{V_r}{V_s} \quad (2)$$

Where,

FF = form factor.

V_r = real volume of the stem.

V_s = volume of the reference solid.

When the reference solid is a cylinder $V_s = g * h$, where g = basal area and h = height.

For the form factor at 10% of total stem height, in the Equation 3, the influence of the tree size on the form factor is eliminated by measuring the diameter for the reference solid at a percentage of the tree's total height. Thus, the diameter is obtained at the same relative height in trees of different heights. The form factor corresponding to the diameter measured at the height of 10% of the total height and using the Huber method to estimate sectional volumes is called the natural or Hohenadl form factor (equation 3). Therefore, the natural form factor was obtained from the following relationship (note that the volume of the cylinder in this case is $V_s = g_{0.1}H$) (Prodan et al., 1997).

$$FF_{0.1H} = \frac{V_r}{g_{0.1} * H} \quad (3)$$

Where,

$FF_{0.1H}$ = form factor at 10% of total stem height.

$g_{0.1}$ = stem cross-sectional area at one-tenth of total height,

H = total height of the tree.

We tested for normality, using Shapiro-Wilks and Kolmogorov-Smirnov test according to the sample size, and homoscedasticity using Levene test. Then, we performed an ANOVA using the software SAS. 9.4 TS to test differences in volume and form factor comparing: i) the destructive and non-destructive sampling methods and ii) ages of the CFP.

Mathematical forest models to estimate stem volume

Based on the values already calculated using the sectional method for stem volume, height and normal diameter, five mathematical models (Table 1) commonly used in forest sciences were used to estimate the stem volume. These models are commonly applied in the construction of volume tables (Clutter et al., 1983; Prodan et al., 1997; Santos et al., 2019). According to the fulfilment of assumptions, the best model for calculating the volume of the three evaluated ages of the CFP was identified. In addition, we identified the correlation between the volume estimated by each model and the real volume (obtained from the sectional method). To select the best model, seven different statistical parameters related to precision and volume variation of each model were ranked, giving a weight 1 to the lowest value and increasing weights for the other models according to Hernández-Ramos et al., (2018), except for the R^2_{adj} that a high value is given a weight 1. The statistical parameters

evaluated in the weighting table were calculated F value, variance (Var), calculated standard error (SEE), mean square error (RMSE), coefficient of variation (CV%), adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}) and values of the Shapiro Wilk tests for ages 10 and 15 and Kolmogorov Smirnov for age 20 (SW/KS).

Tabla 2.1 Models used to estimate the volume of *Pinus pseudostrabus* in commercial forest plantations in CINSJP, Western Mexico. V = Volume of the stem; ND = normal diameter; H = Height of the stem; b0, b1, b2, b3= regression parameters.

Model	Equation
<i>Schumacher-Hall</i>	$V = b_0 ND^{b_1} H^{b_2}$
<i>Schumacher-Hall linearized</i>	$\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln ND + b_2 \ln H$
<i>Spurr - Combined variable</i>	$V = b_0 + b_1 (ND^2 H)$
<i>Australian</i>	$V = b_0 + b_1 ND + b_2 H + b_3 ND^2 H$
<i>Thornber</i>	$V = b_0 \left(\frac{H}{ND}\right)^{b_1} (ND^2 H)$

Subsequently, the sum of the weights resulted in a weighted total score (WT) and the best model for each age were those with the lowest WT (Ramos et al., 2013). Finally, a general model was developed lumping individuals of all ages (Age General Model, AGM) for each of the five models. The models that were optimal for each age, we checked the homoscedasticity for each model, considering that the errors or residuals ($y - \hat{y}$) of the regression must be distributed with equal variance (σ^2) in all range of values of the independent variables (Box-George et al., 2015; Tlaxcala-Méndez et al., 2016). If the assumption is not fulfilled, then the model would have a heteroscedastic behaviour and therefore it cannot be accepted as a final model. We tested for homoscedasticity of the residuals using the Levenne test. To develop and test these models we also used SAS. 9.4 TS software.

- **Results**

We found that *Pinus pseudostrobus* in CISJNP showed an important variation in diameter for trees of specific ages, with older trees being more variable in diameter. Thus, for the age 10, there were two diameter classes, while for the age 20, up to six diameter classes were found (range: 15-20 and 40-45 cm; Table 2). Height also presented variation, even within the same age and especially for older ages. For age 20, we found a mean height of 17.2 m (SE \pm 0.652) for the smaller size class (ND 10-15 cm) and 25.7 m (SE \pm 0.750) for the larger class (ND 40-45 cm). Considering both sampling methods (destructive and non-destructive), we found a big variation in volume with a mean of 0.532 m³ (\pm 0.08) with minimum and maximum values of 0.060 to 1.356 m³, respectively (Table 2).

Our results showed a smaller variation for the form factor (FF_{0.1H}), with values from 0.457 to 0.564 with a mean of 0.507 (SE \pm 0.032). The observed variation in V and FF_{0.1H} was given mainly due to age and diameter class with larger volume and form factor for older ages (Table 2). It is also important to highlight that those trees in the same age, but different size class resulted in very different volume estimations due to the influence of height and diameter (Table 2). In general, both the destructive and non-destructive methods attained similar volume estimations and no statistical differences were found (Table S1). The volume based on the sectional methods was used to yield a volume of 0.534 m³ (SE \pm 0.02) for the destructive and 0.532 m³ (SE \pm 0.02) for the non-destructive method (Table 2). The same pattern was found for the form factor with an estimation of 0.506 (SE \pm 0.011) and 0.507 (SE \pm 0.011) for destructive and non-destructive, respectively (Table 2). We did not find significant differences among the destructive and non-destructive method either for form factor or volume for none of the ages (Table S1).

Tabla 2.2 Volume and form factor for *Pinus pseudostrobus* of different age and by applying a destructive and non-destructive method. DC = diametric class; ND = normal diameter (cm); H = height (m); VD = volume by destructive method (m³); VND = volume by non-destructive method (m³); FFD = form factor by destructive method; FFND = form factor by non-destructive method; SE = standard error.

Age	DC	ND (\pm SE)	H (\pm SE)	VD (\pm SE)	VND (\pm SE)	FFD (\pm SE)	FFND (\pm SE)
10	10-15	12.2 (1.2)	9.6 (0.3)	0.062 (0.01)	0.060 (0.01)	0.457 (0.01)	0.463 (0.01)
10	15-20	17.6 (1.4)	10.8 (0.2)	0.159 (0.01)	0.153 (0.01)	0.465 (0.01)	0.467 (0.01)
15	20-25	22.0 (1.1)	13.7 (0.4)	0.246 (0.01)	0.242 (0.01)	0.486 (0.01)	0.483 (0.01)
15	25-30	27.0 (1.0)	14.7 (0.4)	0.363 (0.02)	0.350 (0.02)	0.482 (0.01)	0.477 (0.01)
15	30-35	32.4 (1.1)	16.0 (0.2)	0.597 (0.03)	0.586 (0.03)	0.488 (0.01)	0.490 (0.01)
20	15-20	18.4 (0.9)	17.2 (0.7)	0.232 (0.01)	0.233 (0.01)	0.508 (0.02)	0.506 (0.02)
20	20-25	22.9 (1.4)	17.4 (0.5)	0.334 (0.02)	0.334 (0.02)	0.527 (0.01)	0.530 (0.01)
20	25-30	27.8 (1.7)	18.8 (0.5)	0.518 (0.03)	0.523 (0.03)	0.520 (0.01)	0.522 (0.01)
20	30-35	33.3 (1.1)	21.8 (1.0)	0.837 (0.03)	0.840 (0.03)	0.543 (0.01)	0.541 (0.01)
20	35-40	37.0 (1.4)	23.0 (0.5)	1.185 (0.03)	1.175 (0.03)	0.530 (0.01)	0.536 (0.01)
20	40-45	42.8 (1.2)	25.7 (0.7)	1.348 (0.04)	1.356 (0.04)	0.558 (0.01)	0.564 (0.01)

We found that age also contribute to variation in the form factor ($FF_{0.1H}$) and volume (Fig. 1), when averaging among diameter class. Thus, trees from the 10 yr. plantation showed a $FF_{0.1H}$ (SE) of 0.425 ± 0.018 , while 20 yr.-old trees reached significantly higher $FF_{0.1H}$ (Fig 1; $F_{2,162} = 48.1$, $p < 0.001$). For the case of volume, estimations were also statically different among ages (Fig. 1b; $F_{2,162} = 42.5$, $p < 0.001$). Finally, the 10 yr. age had a volume mean (SE) of $0.098 (\pm 0.01)$, while the age 20 yr. reached an 8.2-fold higher volume estimation (Fig. 2.1).

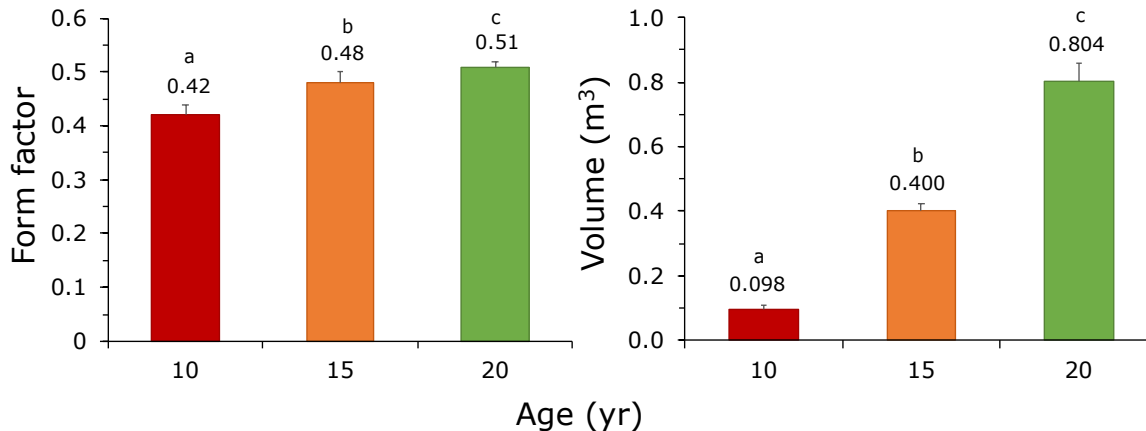


Figura 2.1 Differences in a) form factor and b) volume among ages in commercial forest plantations of *Pinus pseudostrobus* at Western Mexico. Numbers above the bars indicate the exact values of both variables. Statistical differences among ages are indicated by letters based on Tukey test ($p < 0.05$). $N_{Age10} = 30$, $N_{Age15} = 45$, $N_{Age20} = 90$, $N_{total} = 165$.

Mathematical forest models

In general, lumping destructive and non-destructive methods and aiming on age, we found a clear differentiation among ages in the three dendrometric variables (Table S2). The mean (SE) for ND at age 10 was 14.4 cm (± 0.55) and for 20 yr. was two-fold larger. Height also had a similar trend going from 10.06 m (± 0.22) in 10 yr. to 20.62 m (± 0.36) in 20 yr. For volume, we found a mean (SE) of 0.098 m³ (± 0.01) for 10 yr. and for 20 yr. the volume increased 8.9-fold (Table S2).

We found that all five mathematical forest models for all ages predicted successfully the volume (V) based on normal diameter (ND) and height (H), with R^2_{adj} significant values going from low ($R^2_{adj} = 0.8822$) to very high ($R^2_{adj} = 0.9902$; Table 3). The weighting table is shown below (Table 3).

Tabla 2.3 Results obtained for each model in the 3 assessed ages and an age general model (lumping the three ages) for Forest Commercial Plantations of *Pinus pseudostrabus* at CINSJP at Western Mexico. Statistics are as follow: F= test statistic; Var= variance; SEE= standard error of estimation; RMSE= root mean square error; CV%= coefficient of variation; R2= R square; R2adj= R square adjusted; SW/KS= Shapiro Wilk and Kolmogorov Smirnov. Numbers in brackets indicate the weight to identify the best performed model for each statistic and the WT represent the weighted total, which is the sum of all weight. The best model for each age were those with the lowest WT indicate in bold according to (Ramos et al., 2013).

Model	F	Var.	SEE	RMSE	CV%	R ² _{adj}	SW/KS	WT
Age 10								
Schumacher - Hall	371.8 ⁽⁴⁾	0.0030 ⁽²⁾	0.0184 ⁽²⁾	0.017 ⁽¹⁾	16.40 ⁽²⁾	0.8960⁽²⁾	0.371 ⁽²⁾	15
Schumacher-Hall linearized	127.7 ⁽²⁾	0.0030 ⁽²⁾	0.0185 ⁽³⁾	0.018 ⁽²⁾	15.55 ⁽¹⁾	0.8970 ⁽¹⁾	0.117 ⁽³⁾	14
Spurr - combined variable	240.2 ⁽³⁾	0.0040 ⁽³⁾	0.0947 ⁽⁵⁾	0.018 ⁽⁴⁾	19.09 ⁽⁴⁾	0.8919 ⁽³⁾	0.093 ⁽⁴⁾	26
Australian	79.2 ⁽¹⁾	0.0046 ⁽⁴⁾	0.0189 ⁽⁴⁾	0.019 ⁽⁵⁾	19.26 ⁽⁵⁾	0.8899 ⁽⁴⁾	0.452 ⁽¹⁾	24
Thornber	505.2 ⁽⁵⁾	0.0024 ⁽¹⁾	0.0161 ⁽¹⁾	0.018 ⁽³⁾	17.40 ⁽³⁾	0.8822 ⁽⁵⁾	0.092 ⁽⁵⁾	23
Age 15								
Schumacher - Hall	1046.5 ⁽⁴⁾	0.0340 ⁽³⁾	0.0540 ⁽²⁾	0.055 ⁽¹⁾	12.60 ⁽²⁾	0.9860⁽¹⁾	0.459 ⁽³⁾	16
Schumacher-Hall linearized	288.3 ⁽²⁾	0.1768 ⁽⁴⁾	0.1147 ⁽⁴⁾	0.112 ⁽³⁾	11.37 ⁽¹⁾	0.9280 ⁽³⁾	0.205 ⁽⁴⁾	21
Spurr - combined variable	420.1 ⁽³⁾	0.0329 ⁽²⁾	0.0594 ⁽³⁾	0.057 ⁽²⁾	13.28 ⁽⁴⁾	0.9050 ⁽⁵⁾	0.797 ⁽¹⁾	20
Australian	153.3 ⁽¹⁾	0.0329 ⁽²⁾	0.0594 ⁽³⁾	0.057 ⁽²⁾	12.77 ⁽³⁾	0.9121 ⁽⁴⁾	0.784 ⁽²⁾	17
Thornber	1473.1 ⁽⁵⁾	0.0292 ⁽¹⁾	0.0519 ⁽¹⁾	0.182 ⁽⁴⁾	13.54 ⁽⁵⁾	0.9850 ⁽²⁾	0.083 ⁽⁵⁾	23
Age 20								
Schumacher - Hall	9733.2 ⁽⁴⁾	0.2520 ⁽³⁾	0.0640 ⁽⁴⁾	0.0490 ⁽³⁾	6.40 ⁽¹⁾	0.9890 ⁽³⁾	0.143 ⁽³⁾	21
Schumacher-Hall linearized	3035.5 ⁽²⁾	0.4737 ⁽⁵⁾	0.0879 ⁽⁵⁾	0.8690 ⁽⁵⁾	6.60 ⁽⁴⁾	0.9320 ⁽⁵⁾	0.220 ⁽¹⁾	27
Spurr - combined variable	8628.9 ⁽³⁾	0.2509 ⁽¹⁾	0.0500 ⁽²⁾	0.0490 ⁽²⁾	6.41 ⁽²⁾	0.9901 ⁽²⁾	0.063 ⁽⁵⁾	17
Australian	2888.2 ⁽¹⁾	0.2510 ⁽²⁾	0.0493 ⁽¹⁾	0.0487 ⁽¹⁾	6.40 ⁽¹⁾	0.9902⁽¹⁾	0.150 ⁽²⁾	9
Thornber	14587.6 ⁽⁵⁾	0.2553 ⁽⁴⁾	0.0505 ⁽³⁾	0.0499 ⁽⁴⁾	6.50 ⁽³⁾	0.9898 ⁽⁴⁾	0.136 ⁽⁴⁾	27
General								
Schumacher - Hall	11439.5 ⁽⁴⁾	0.2140 ⁽⁴⁾	0.0490 ⁽³⁾	0.0490 ⁽²⁾	16.5 ⁽⁴⁾	0.9050 ⁽⁴⁾	0.205 ⁽³⁾	24
Schumacher-Hall linearized	4734.7 ⁽²⁾	0.9275 ⁽⁵⁾	0.1244 ⁽⁵⁾	0.1240 ⁽⁵⁾	26.4 ⁽⁵⁾	0.8898 ⁽⁵⁾	0.409 ⁽²⁾	29
Spurr - combined variable	13621.6 ⁽⁵⁾	0.2131 ⁽³⁾	0.0498 ⁽⁴⁾	0.0500 ⁽⁴⁾	14.1 ⁽²⁾	0.9061 ⁽³⁾	0.127 ⁽⁵⁾	26
Australian	4632.1 ⁽¹⁾	0.1942 ⁽¹⁾	0.0440 ⁽¹⁾	0.0500 ⁽³⁾	13.7 ⁽¹⁾	0.9089⁽¹⁾	0.156 ⁽⁴⁾	12
Thornber	9067.6 ⁽³⁾	0.2018 ⁽²⁾	0.0454 ⁽²⁾	0.0451 ⁽¹⁾	16.2 ⁽³⁾	0.9088 ⁽²⁾	0.988 ⁽¹⁾	14

Based on the Weighted Total, which consider the weight of all statistics parameters, we identified the best models. However, none of the five models reached the highest WT for

all ages or AGM and each age had a specific best performed model. Thus, for 10 yr. and 15 yr., the best model was Schumacher – Hall, while for 20 yr. and the general model (AGM), the Australian was the best performed model (Table 3; Table 4). These two models included in their equation three and four regression parameters, respectively, and specifically, the Australian include a combined variable (ND*H; Table 4).

Tabla 2.4 Regression parameters and equations for the three ages and the Age General Model (AGM). The best model for each age was one of the five tested. V = volume; ND = normal diameter; H = height; b0, b1, b2, b3 = regression parameters.

Model	Age	b0	b1	b2	b3	Equation
<i>Schumacher- Hall</i>	10	0.00078	1.8661	1.890		$V = 0.000788ND^{1.8661}H^{1.8902}$
<i>Schumacher- Hall</i>	15	0.09	1.9179	1.495		$V = 0.09ND^{1.9179}H^{1.4959}$
<i>Australian</i>	20	0.13551	0.000915	-0.00768	0.37559	$V = 0.13551 + 0.0009158ND$ $- 0.00768H$ $+ 0.37559ND^2H$
<i>Australian</i>	AG M	0.02459	0.06466	-0.00157	0.36322	$V = 0.02459 + 0.06466ND$ $- 0.00157H$ $+ 0.36322ND^2H$

All best performed models for each age showed their residuals distributed with equal variance along the values of the axes ND, H and the combined variable (ND*H; Fig. S1) and we found p-values ranging between 0.825 and 0.957 based on the Levene test, indicating normality of residuals (Table S3). Below are the graphs of the mathematical models chosen for each age and the AGM model, in Figure 2.2.

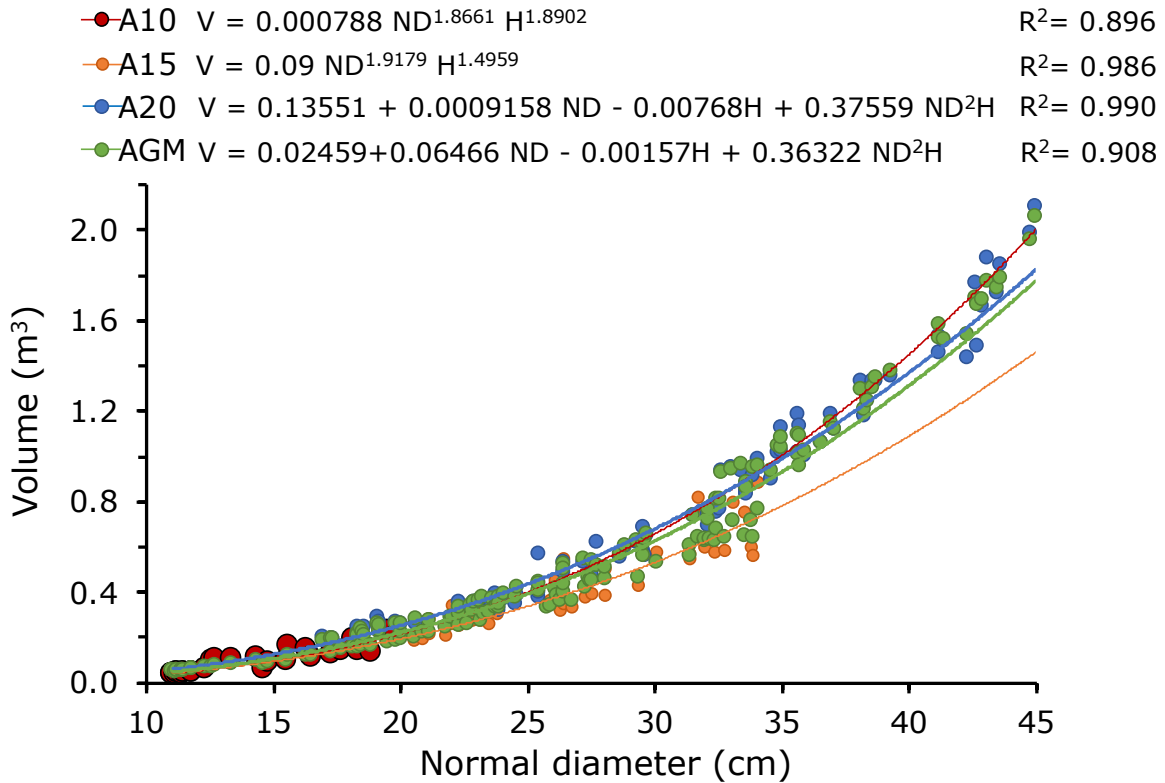


Figura 2.2 Best performed models to estimate volume for each age and lumping all ages (AGM) for *Pinus pseudostrabus* in commercial forest plantation at Western Mexico. For age 10 and 15 the best model was Schumacher-Hall, while for 20 and AGM the Australian model was the one with lowest WT. The equation, including the regression parameters, and the R^2_{adj} for each age are shown. V = Volume, ND = Normal diameter and H = Height.

- **Discussion**

Volume variation occurs since the growth and allometry of a tree depend on factors such as the position of the stem in the forest, the availability of nutrients, the state of health of the individual and the microenvironment where the tree is established (light, water availability, etc.; (Cancino, 2012; Tlaxcala-Méndez et al., 2016; Veintimilla et al., 2019). These events are the main cause of the large variation in estimated volume (V) and form factor (FF). In

our study, we found a large variation in size, both in diameter and height, within the same age, and especially for individuals aged 20 yr., we found up to six diametric classes, in trees with a range of 16.9-44.9 cm of normal diameter and a height of 17.9-28.3 m. Although a large variation was found within the same age, we emphasized the statistical differences in both FF and V between plantations of different ages. These differences have serious consequences for the forest industry, as it will directly affect the FF and V estimation and consequently, the projected wood production and quality. In general, for *P. pseudostrobus* in the forestry industry, a fixed (0.45) or sometimes arbitrary (0.55-0.70) standard form factor is used (García et al., 2016). We highlight the correct estimation and use of the appropriate FF for the benefit of plantation owners and forest management, as well as the use of age-specific FF as these changes in allometric relationships result in erroneous V estimates (Phiri et al., 2016).

Commercial forest plantations (CFP) must have a rigorous forest management plan to meet high quality standards in their final products. Pruning, fertilization and thinning must be carried out in the time and manner established in the management plan (Santos et al., 2019; Subiakto et al., 2016) to avoid the presence of low diametric classes or trees that do not correspond to the age of the plantation (Orozco, 2008). Appropriate forest management activities carried out in CFP generally guarantees better estimates of the FF compared to those of natural forests (Tlaxcala-Méndez et al., 2016; Uranga-Valencia et al., 2015). In this study, we estimated a mean FF value of 0.506 (SE \pm 0.01), higher or similar when compared to other studies such as those of Uranga-Valencia et al., (2015), who obtained a FF between 0.447 and 0.506 for *Pinus patula* in three different regions of Mexico. Several other studies with *Pinus* species in other countries (Dávila Molina, 2017; Jacobs et al., 2019; Phiri et al.,

2016) have found values between 0.47 and 0.57. In previous research in the same study area in the CFP of CINSJP in Michoacán, but in natural forest, García-Espinoza et al., (2019) found an average FF of 0.46 (SE \pm 0.03), showing that managed forest presents better parameters for V estimation, such as FF. databased on our results, the CINSJP can establish objectives for forest conservation and management in the natural forest, and for improving the forest quality, through constant monitoring by using forest surveys.

Forest surveys serve as a monitoring tool to observe the state and quantity of stem volume in natural forests and CFPs (Cancino, 2012). In cases where there are no V estimation models specific to the sampling area, destructive sampling is required in order to have a real V calculation. To do this, a sectional method is performed, which is generally not feasible, since standing trees are the main product of the forest management program for future extraction (Prodan et al., 1997). Therefore, non-destructive methods emerge as the best option for faster V estimation as it is not necessary to cut down trees, although accurate estimates are required. Our findings show that the estimates of *P. pseudostrabus* V and FF based on a non-destructive method (mean V SE: $0.532 \text{ m}^3 \pm 0.026$; mean $\text{FF}_{0.1\text{H}}$ SE: 0.507 ± 0.013) resulted in estimates like those obtained from the classical theory that uses destructive methods (mean V SE: $0.534 \text{ m}^3 \pm 0.027$; mean $\text{FF}_{0.1\text{H}}$ SE: 0.506 ± 0.011 ; Table 2 and Table S1). Therefore, we highly recommend, based on our findings, the use of the non-destructive method to estimate V and FF in CFP of *P. pseudostrabus* in order to guarantee forest and natural resources sustainability that CPF provide.

The absence of statistically significant differences between destructive and non-destructive methods opens up many possibilities for factors that may determine variability in V and FF among DCs. Therefore, based on our results, we confirm that age is a very

important factor to obtain accurate and reliable results close to the actual V values. This statement agrees with Talita et al., (2018) regarding CFPs oriented to wood production. We also found that the Schumacher-Hall model fit better at 10 and 15 yr. while the Australian, which includes the combined variable: diameter and height (ND*H), was a better model for 20 yr. and for the AGM. This indicated that each model better adjusted the ratio of ND and H, and this may be related to changes in growth and allometric relationships throughout the life cycle of the species (Akossou et al., 2013). Meeting criteria for better model fit is of vital importance when deciding the suitability of the models, as failing, the V estimate will be deficient and the predictions will be inaccurate (Álvarez-gonzález & Rojo-alboreca, 2007; García et al., 2016; García-Espinoza et al., 2019; Martínez-Angel et al., 2019; Uranga-Valencia et al., 2015). For the Age General Model (AGM), which included individuals of all ages, we found the Australian as the best model to predict V, being recommended in the literature for natural forests, when the age of a plantation is unknown, dendrochronological studies are difficult to complete (Hernández-Ramos et al., 2018) or for academic and training purposes, since it is not necessary to fell the tree. However, it should be considered that the accuracy of this model in general is lower compared to models for ages 10, 15 and 20 yr. Therefore, our results show that it is important to partition into ages and diametrical classes when estimating V and FF for future research in CFP and in natural forests where dendrochronological analyses are possible to perform.

Methods to estimate V and FF in both planted and natural settings are key activities for forest management, conservation and sustainable use. We assessed mathematical models for V estimation, for each specific age, with good fit and precision, suggesting the limitation that when performing volume estimation of *P. pseudostrobus* CPF, an accurate age

estimation of the plantation and a precise knowledge of the mathematical model to use should be taken into account. When making a wrong decision in one of these two aspects, there will be a high probability the field technician fails to estimate correctly the stem volume (Vázquez-Bautista et al., 2016; West, 2009). The advantages of having specific mathematical models for each age is that they allow monitoring surveys to be carried out at each planting site, without the need for destructive sampling, since these mathematical models offer estimates of V very close to the real ones. Therefore, not requiring destructive sampling to have optimal values of V allows the appropriate management and sustainability of forests, and consequently, the estimation of biomass and carbon sequestration rates, which allows to monitor the amounts of carbon stored in both planted and natural forests and discriminating according to planting ages, diameter classes or other variables of interest for forest management and conservation.

- **Conclusions**

The models for each age presented a better fit than the AGM, with more precise volume estimates, which allows us to recommend the use of volume estimation models for each age, in ranges of five yr. in CFPs of *P. pseudostrobus*. We also recommend the use of specific form factor by age range as we shown in this study, as it may help to improve not only the estimation of the stem volume, but also to control the yields in wood production and use for each plantation improving forest management strategies.

P. pseudostrobus is one the most important forest resources in Mexico. Specifically, for the CINJSP, it represents the best species for timber and resin production from which the community makes its most important profits. We believe our study can contribute to a quick

and precise estimation of volume and form factor and in general to guide the community for better forest management practices. Also, we suggest to follow rigorously the forest management plan, especially in relation to clearing, pruning and thinning to obtain better volume and better profitability and sustainability of the forest.

Acknowledgements, we are especially grateful to the Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, in Western Mexico, for the availability of their plantations for the development of this study and for providing transportation and personnel to accompany the samplings carried out. To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), for the scholarship granted to finance the doctorate of the main author, whose scholarship number is 701872.

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

ORCID.

David E. Dávila-Molina: <https://orcid.org/0000-0002-8455-2157>

Cuauhtémoc Sáenz-Romero: <https://orcid.org/0000-0002-8945-3959>

Oscar Alberto Aguirre-Calderón: <https://orcid.org/0000-0001-5668-8869>

Leonel Lopez-Toledo: <https://orcid.org/0000-0003-3424-5746>

References

- Akossou, A. Y. J., Arzouma, S., Attakpa, E. Y., Fonton, N. H., & Kokou, K. (2013). Scaling of teak (*tectona grandis*) logs by the xylometer technique: Accuracy of volume equations and influence of the log length. *Diversity*, 5(1), 99–113. <https://doi.org/10.3390/d5010099>
- Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V. M., Collantes-Chávez-Costa, A., Buendía-Rodríguez, E., Mora-Olivo, A., Sánchez-Castillo, L., & Alcalá-Rojas, A. G. (2021). Structure, composition and carbon stocks of woody plant community in assisted and unassisted ecological succession in a Tamaulipan thornscrub, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 94(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S40693-021-00102-6/FIGURES/4>

- Álvarez-gonzález, J. G., & Rojo-alboreca, R. R. A. (2007). *Simultáneo De Sistemas De Ecuaciones: Heterocedasticidad Y Variables Dependientes Con Distinto Número De Observaciones*. 42(July 2016), 35–42.
- Blanco-Flórez, J., Fernando-Trugilho, P., Tarcisio-Lima, J., Gherardi-Hein, P. R., & Moreira Da Silva, J. R. (2014). *Characterization of young wood Tectona grandis L. f. planted in Brazil*. 20, 11–20.
- Box-George, E. P., Jenkins-Gwilym M., Reinsel-Gregory C., & Ljung-Greta M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. John Wiley & Sons. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=rNt5CgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&ots=DK51BTk1WE&sig=rhAcELsi3vP0HfZ1xSUEz0-UbLo#v=onepage&q&f=false>
- Castellanos-Acuña, D., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Sánchez-Vargas, N. M., Lobbit, P., & Montero-Castro, J. C. (2013). Variación altitudinal entre especies y procedencias de pinus pseudostrobus, P. devoniana y P. leiophylla. ENSAYO DE VIVERO. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(3), 399–411. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.01.002>
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., & Bailey, R. L. (1983). *Timber management: A quantitative approach* (Wiley, Ed.).
- Coronel Toro, A. J. (2019). Captura de Carbono de Theobroma cacao L con Modelamiento y Redes Neuronales Artificiales en Jose Olaya, Nieva, Amazonas. *Repositorio Institucional - UNJ*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2317346>
- Corral-Rivas, J. J., Vega-Nieva, D. J., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sánchez, C. A., Wehenkel, C., Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Compatible System for Predicting Total and Merchantable Stem Volume over and under Bark, Branch

Volume and Whole-Tree Volume of Pine Species. *Forests* 2017, Vol. 8, Page 417, 8(11), 417. <https://doi.org/10.3390/F8110417>

Cruz De León, G., Alfaro-Trujillo, I., & Bañuelos-Jiménez, M. (2016). *Error predictions for average end diameter sectional formula in tree stem volume measurement Predicciones de error para la fórmula seccional del promedio de diámetros extremos en la medición del volumen de tronco de árbol.* 37(1), 211–215. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100020>

Cruz de León, G., & Cruz de León, J. (2006). The segmental conic model for forest measurements. *Madera y Bosques*, 12(2), 91–96. <https://doi.org/10.21829/MYB.2006.1221245>

Cruz De León, G., & Uranga-Valencia, L. P. (2013). Theoretical evaluation of Huber and Smalian methods applied to tree stem classical geometries Evaluación teórica de los métodos de Huber y Smalian aplicados a las geometrías clásicas de tronco de árbol. *BOSQUE*, 34(3), 311–317. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002013000300007>

Dávila, D. E., Alvis, J. F., & Ospina, R. (2012). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL, ESTRUCTURA Y VOLUMEN DE LOS BOSQUES DE ROBLE NEGRO (*Colombobalanus excelsa* (Lozano, Hern. Cam. & Henao, J.E.) Nixon & Crepet) EN EL PARQUE NACIONAL NATURAL CUEVA DE LOS GUÁCHAROS. *Colombia Forestal*, 15(2), 207–214. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392012000200005&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Dávila Molina, D. E. (2017). *Estimación de volumen y forma para fustes de árbol de seis especies tropicales de bosque Andino de Colombia TESIS.* 1–100.

- de Eugenio, A., Fernández-Landa, A., & Merino-de-Miguel, S. (2018). 3D models from terrestrial photogrammetry in the estimation of forest inventory variables. *Revista de Teledetección*, 0(51), 113–124. <https://doi.org/10.4995/RAET.2018.9174>
- Dean, T. J., & Long, J. N. (1986). Validity of Constant-stress and Elastic-instability Principles of Stem Formation in *Pinus contorta* and *Trifolium pratense*. *Annals of Botany*, 58, 833–840. <https://academic.oup.com/aob/article/58/6/833/254441>
- del Río, M., Pretzsch, H., Alberdi, I., Bielak, K., Bravo, F., Brunner, A., Condés, S., Ducey, M. J., Fonseca, T., von Lüpke, N., Pach, M., Peric, S., Perot, T., Souidi, Z., Spathelf, P., Sterba, H., Tijardovic, M., Tomé, M., Vallet, P., & Bravo-Oviedo, A. (2015). Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives. *European Journal of Forest Research* 2015 135:1, 135(1), 23–49. <https://doi.org/10.1007/S10342-015-0927-6>
- García, G., Jesús, J., Magaña, G., Ramos, J. H., Jesús, H., Flores, M., Cuevas, X. G., & Ramos, A. H. (2016). Accuracy of form coefficients and quotients in estimating the volume of *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 19–36.
- García-Espinoza, G. G., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Martínez-Ángel, L., García-Magaña, J. J., & Hernández-Ramos, J. (2019). SISTEMA COMPATIBLE DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN COMERCIAL DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN NUEVO SAN JUAN PARANGARICUTIRO, MICHOACÁN, MÉXICO. *Agrociencia*, 53(1), 115–131. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1755>
- Heredia-Acuña, C., Almaraz-Suarez, J. J., Arteaga-Garibay, R., Ferrera-Cerrato, R., & Pineda-Mendoza, D. Y. (2019). Isolation, characterization and effect of plant-growth-promoting

- rhizobacteria on pine seedlings (*Pinus pseudostrobus* Lindl.). *Journal of Forestry Research*, 30(5), 1727–1734. <https://doi.org/10.1007/S11676-018-0723-5>
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Tamarit-Urias, J. C., Martínez-Ángel, L., & García-Magaña, J. (2018). Total volume and ratio equations to estimate the commercial volume of *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34–46. <https://doi.org/10.14483/2256201X.11965>
- Jacobs, M., Rais, A., & Pretzsch, H. (2019). Analysis of stand density effects on the stem form of Norway spruce trees and volume miscalculation by traditional form factor equations using terrestrial laser scanning (TLS). *Https://Doi.Org/10.1139/Cjfr-2019-0121*, 50(1), 51–64. <https://doi.org/10.1139/CJFR-2019-0121>
- Lana, M. D., Netto, S. P., Corte, A. P. D., Sanquetta, C. R., & Ebling, A. A. (2015). Prognose da Estrutura Diamétrica em Floresta Ombrófila Mista. *Floresta e Ambiente*, 22(1), 71–78. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.072914>
- Martínez-Angel, L., de los Santos-Posadas, H. M., Fierros-González, A. M., Cruz-Cobos, F., Quiñonez-Barraza, G., Tecnológico, del, Salto, E., & Nuevo, P. (2019). FUNCIONES COMPATIBLES DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN EN UNA PLANTACIÓN FORESTAL COMERCIAL DE *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen EN TLATLAUQUITEPEC, PUEBLA. *Agrociencia*, 53(3), 381–401. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1791>
- Morales-Arias, J. G., Olvera-Vargas, M., Cuevas-Guzmán, R., Figueroa-Rangel, B. L., & Sánchez-Rodríguez, E. v. (2018). Environmental variation and floristic composition of tree species in a humid mountain forest in western Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), 769–783. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2018.3.2456>

- Murrieta, E., Finegan, B., Delgado, D., Villalobos Soto, R., & Campos Arce, J. J. (2007). *Identificación y caracterización florística de bosques naturales en el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6363>
- Orozco, S. J. (2008). *FOREST FIRE RISK MODEL FOR MICHOACAN, MEXICO*.
- Phiri, D., Phiri, E., Kasubika, R., Zulu, D., & Lwali, C. (2016). The implication of using a fixed form factor in areas under different rainfall and soil conditions for *Pinus kesiya* in Zambia. *Http://Dx.Doi.Org/10.2989/20702620.2015.1108614*, 78(1), 35–39. <https://doi.org/10.2989/20702620.2015.1108614>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal*. San José: IICA-GTZ. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0BfaTECpREEC&oi=fnd&pg=PA2&dq=mensura+forestal&ots=gfFOdceJxk&sig=FfQyo6gMoRwOFMV2qjpAQIID67s#v=onepage&q=mensura%20forestal&f=false>
- Ramos, J. H., Jesús, J., Magaña, G., Jesús Muñoz Flores, H., Garcíacuevas, X., Reyes, T. S., Flores López, C., & Ramos, A. H. (2013). Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. et Cham. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 62–77. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000500006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Riecke. (1849). *Ueber die Berechnung des körperlichen Inhalts unbeschlagener Baumstämme* - Friedrich Riecke - Google Libros. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=imQ7AAAACAAJ&oi=fnd&pg=PA1&ots=f eMGJquYyX&sig=4jdwTEqdmqFyrv_hGcmunR9HknU#v=onepage&q&f=false
- Rodríguez, S. A., Cristiano, P. M., Lezcano, O. A., Suirezs, T. M., Díaz Villa, M. V. E., Bucci, S. J., Goldstein, G., & Campanello, P. I. (2020). Crown structural properties, wood density, and

liana load: influence on growth and mortality in subtropical forests. <https://doi.org/10.1139/Cjfr-2020-0002>, 51(1), 111–121. <https://doi.org/10.1139/CJFR-2020-0002>

Rodríguez-Ortiz, G., Aragón-Peralta, R. D., Enríquez-del Valle, J. R., Hernández-Hernández, A., Santiago-García, W., & Campos-Angeles, G. v. (2020). Calidad de plántula de progenies selectas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* del sur de México. *Interciencia*, 45(2), 96–101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33962521007>

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., & López-Upton, J. (2012). ALTITUDINAL GENETIC VARIATION AMONG *Pinus pseudostrobus* POPULATIONS FROM MICHOACÁN, MÉXICO. TWO LOCATION SHADEHOUSE TEST RESULTS. *Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex*, 35(2), 111–120.

Santos, M. F. dos, Filho, A. F., Gama, J. R. V., Retslaff, F. A. de S., Costa, D. L. da, Gomes, K. M. A., Cruz, G. da S., & Almeida, B. R. S. de. (2019). EFICIÊNCIA DE EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS PARA *Manilkara spp.* EM FLORESTA MANEJADA NA AMAZÔNIA ORIENTAL. *Nativa*, 7(5), 621–628. <https://doi.org/10.31413/NATIVA.V7I5.7804>

Subiakto, A., Rachmat, H. H., & Sakai, C. (2016). Choosing native tree species for establishing man-made forest: A new perspective for sustainable forest management in changing world. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 17(2), 620–625. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D170233>

Talita, C., Carlos, P., Sanquetta², R., Felipe, M., Larissa, N., & Topanotti³, R. (2018). Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. *Advances in Forestry Science*, 5(3), 431–436. <https://doi.org/10.34062/AFS.V5I3.6495>

- Tlaxcala-Méndez, R. M., de los Santos-Posadas, H. M., Hernández-de la Rosa, P., & López-Ayala, J. L. (2016). *Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (Cedrela odorata L.)*. *Agrociencia* 50. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000100089&script=sci_arttext
- Uranga-Valencia, L. P., de Los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., López-Upton, J., & Navarro-Garza, H. (2015). VOLUMEN TOTAL Y AHUSAMIENTO PARA *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. EN TRES CONDICIONES DE BOSQUE TOTAL VOLUME AND TAPER FOR *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. AT THREE FOREST CONDITIONS. *Agrociencia*, 49, 787–801.
- Urbano, E., Machado, S. do A., Figueiredo Filho, A., Sanquetta, C. R., Zea-Camaño, J. D., Urbano, E., Machado, S. do A., Figueiredo Filho, A., Sanquetta, C. R., & Zea-Camaño, J. D. (2018). Modelación del volumen de rodal para especies secundarias en bosques nativos de *Mimosa scabrella* en la región metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. *Bosque (Valdivia)*, 39(2), 227–237. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200227>
- Vásquez-Bautista, N., Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., Romo-Lozano, J. L., Vásquez-Bautista, N., Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., & Romo-Lozano, J. L. (2016). Forest biometric models in Hidalgo, Mexico: state of the art. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(3), 351–367. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2015.09.043>
- Veintimilla, D., Ngo Bieng, M. A., Delgado, D., Vilchez-Mendoza, S., Zamora, N., & Finegan, B. (2019). Drivers of tropical rainforest composition and alpha diversity patterns over a 2,520 m altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9(10), 5720–5730. <https://doi.org/10.1002/ECE3.5155>

- Velázquez, A., Bocco, G., Torres, A., Lopez, A. C., & Gómez, F. A. (2015). Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, Mexico. *Forest Plans of North America*, 169–175. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799936-4.00020-5>
- Wegiel, A., & Polowy, K. (2020). Aboveground Carbon Content and Storage in Mature Scots Pine Stands of Different Densities. *Forests 2020, Vol. 11, Page 240, 11(2)*, 240. <https://doi.org/10.3390/F11020240>
- West, P. W. (2009). Measurements. *Tree and Forest Measurement*, 5–10. https://doi.org/10.1007/978-3-540-95966-3_2

3. CAPITULO III: Biomasa aérea y el carbono contenido en *Pinus pseudostrobus* en San Juan Nuevo, Michoacán

La edad de la plantación determina la biomasa aérea y el carbono contenido en *Pinus pseudostrobus*

David E. Dávila Molina^{a*}, Leonel López Toledo^b, Selene Ramos Ortiz^c,
Mariela Gómez Romero^d, Oscar Aguirre Calderon^e, Cuauhtémoc Sáenz-
Romero^b, José Cruz de León^f, Román Ospina Montealegre^f

^a Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas en la opción en Ciencias Agropecuarias, Forestales y Ambientales, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México; ^bInstituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México; ^c Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; ^d Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo(UMSNH), Fac. Biología, Cátedra CONACYT, Morelia, Michoacán, México; ^e Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N. L, México; ^f Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia.

Resumen

La falta de control en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente el CO₂, conlleva a que a nivel global haya la necesidad de tener información sobre las coberturas boscosas con las que cuenta cada región y su contenido de carbono (CC) en la biomasa de estos bosques. De ahí que este estudio tiene como objetivo principal, realizar una evaluación de modelos matemáticos conocidos, que mejor ajuste presenten en la estimación de biomasa aérea (BM), utilizando variables independientes como el diámetro normal (ND) y la altura (H), en plantaciones forestales comerciales (CFP) de *Pinus pseudostrobus*, con edades de a)10, b)15 y c)20 años, pertenecientes a la Comunidad Indígena de San Juan Nuevo Parangaricutiro (CISJNP). Se encontraron clases diamétricas de 10 a 45 cm en rangos de 5cm cada clase diamétrica, distribuidas entre las tres edades, la biomasa aérea fue calculada para cada edad, utilizando métodos destructivos, para la obtención del volumen (V) y densidad aparente (DA), obteniendo resultados entre 0.061 y 1.350 m³ de V y valores entre 0.38 a 0.57 g cm⁻³ de DA, lo que permitió obtener la biomasa aérea total (BMT) de 47.38, 215.463, 408.702 Mg ha⁻¹ y CC de 18.952, 101.267, 241.134 Mg ha⁻¹ para las edades de a, b y c años respectivamente. Los modelos de mejor ajuste fueron el de Schumacher-Hall para la edad de 10 y 20 años y el modelo Australiano para la edad b años. Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la edad, es un factor muy importante, tanto en plantaciones como en bosque natural, que debe ser tenido en cuenta para planes de manejo productivo y conservación de bosques.

3.1 Introducción

Los efectos negativos que causan los cambios de los climas locales y globales, se deben a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, ocasionados por la falta de control de emisiones y flujos de carbono, que constituyen temas de vital importancia, debido a que el CO₂ es el gas con mayores emisiones anuales, junto con el CH₄, los cuales en el año 2005, excedieron considerablemente la cantidad de emisiones naturales de los últimos 650,000 años, de acuerdo con Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007). Las principales fuentes de emisión de CO₂ son el uso de combustibles fósiles y la producción de cemento en los países industrializados, del mismo modo, la deforestación desmedida y cambio de uso de la tierra en países tropicales (Lugo & Brown, 1992).

Por lo tanto, los sistemas forestales representan un papel importante como sumideros de carbono, reconocidos oficialmente por el tratado de Kioto, ya que los bosques ayudan a reducir las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y por tanto a mitigar el efecto del cambio climático global (IPCC, 2007; Lugo & Brown, 1992; Ordóñez Díaz et al., 2015). Por ello es importante incrementar las masas forestales, mediante forestación y reforestación, ayudando así a reducir el CO₂ que se libera a la atmósfera (Dixon et al., 1994).

Es necesario mejorar esta situación avanzando en la estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea forestal existente con la mayor exactitud posible, a efectos de modelar los flujos de carbono por cambio del uso de la tierra cuyos resultados dependerán en gran parte de las cuantificaciones de biomasa de los bosques. Según la FAO (2010), las plantaciones forestales son alternativas estratégicas que ayudan a incrementar la captación del carbono, en una manera rápida y eficaz, representando hasta el año 2007, más de 190

millones de hectáreas, a nivel global (5% de la cobertura forestal total). Por lo tanto, este estudio se realizó en las plantaciones forestales comerciales (PFC), de *Pinus pseudostrabus* Lindl., en la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CISJNP), evaluando edades de 10 (a), 15 (b) y 20 (c) años, las cuales son objeto de interés de la comunidad, con respecto a la necesidad de tener un cálculo estimado de biomasa aérea y el carbono contenido.

La estimación del carbono contenido en la biomasa forestal puede ser calculado mediante métodos directos o indirectos. Los métodos directos, requieren un muestreo destructivo, para la estimación de los pesos seco y verde, para obtener la densidad de la madera (d), de cada componente de los árboles que sean objeto de estudio. Los métodos indirectos, son aquellos que utilizan modelos matemáticos, para estimar los pesos de los componentes del árbol, mediante el uso de variables independientes, como pueden ser el diámetro normal (DN) y la altura (H). A pesar de ello, para obtener los modelos matemáticos, se requiere obtener los datos, mediante métodos directos (Bloomberg et al., 2008; Blujdea et al., 2012).

Dicho lo anterior, este estudio utilizó el método directo, para la obtención de las muestras en las edades “a”, “b” y “c”, de las cuales se extrajeron los datos necesarios para el cálculo de variables de interés, tales como volumen, factor de forma y densidad de la madera, que permiten la obtención de los valores de biomasa y carbono contenido, para posteriormente evaluar modelos matemáticos, también llamados ecuaciones alométricas, que estiman la biomasa aérea en árboles a partir de la altura y el diámetro a la base del fuste o DN, permitiendo así, la estimación de la biomasa aérea con gran precisión, en otros sitios con características similares de las PCF de la CISJNP. Al respecto, Bloomberg et al. (2008), y (Jackson et al., 2012) concuerdan en que las relaciones alométricas en plantas cultivadas

en vivero son afectadas por el sistema de producción y las condiciones de cultivo. Igualmente, otros autores señalan que distintos factores pueden influir en las relaciones alométricas de las plantas, como la edad (Geudens et al., 2004), el estrés debido al trasplante (Ortega et al., 2006), la densidad de cultivo y el volumen del contenedor (Rodríguez-Ortiz et al., 2020), incluso, pueden diferir entre especies de coníferas (Takahashi & Obata, 2013).

El presente estudio, tuvo como objetivos, estimar la biomasa aérea y el carbono contenido en PFC de *Pinus pseudostrobus* Lindl., para edades de a, b y c, mediante el uso de métodos directos, tomando en cuenta variables específicas tales como volumen de madera promedio (V) y densidad aparente promedio de la madera (DA) para cada edad evaluada, partiendo del supuesto de que para cada clase diamétrica (CD) encontrada dentro de cada edad, existe un V y una DA, específicos para esa CD. Así como también la evaluación de modelos matemáticos que permitan la estimación precisa y confiable de la biomasa aérea en las PFC de cada edad.

3.2 Metodología

3.2.1 Área de estudio

Este estudio se desarrolló en las PFC establecidas en el CINSJP, que tiene un área de 18,138 ha, y se ubica geográficamente en la región Centro Oeste del estado de Michoacán entre 19 ° 25'-19 ° 34 'N y 102 ° 00' -102 ° 17 'W. El clima es templado húmedo tipo C (w2) con una temperatura media anual de 15.2 °C y una precipitación media anual de 1,600 mm (Sáenz-Romero et al., 2012). Los suelos son de origen volcánico y las unidades de Andosol, Regosol y Feozems. El tipo de cobertura forestal dominante corresponde a una asociación natural de bosques de pino-encino, los cuales se encuentran bajo manejo forestal, con el Método Mexicano para el Manejo de Bosques Irregulares (MMOBI) y el Método de Desarrollo

Silvícola (MDS), la cosecha de madera anual es de aproximadamente 65,000 m³ (Velázquez et al., 2015). Las especies arbóreas más representativas son *Pinus devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. douglasiana* Martínez, *P. leiophylla* Schl. & Cham., *P. pseudostrobus* Lindl., *Quercus laurina* Humb et Bonpl., *Q. castanea* Muhl., *Q. rugosa* Neé, *Abies religiosa* Kunth Schltl. et Cham., *Arbutus xalapensis* Kunth, *Cornus disciflora* Sessé & Moc., *Tilia mexicana* Schltl., *Alnus acuminata* H.B.K. y *Alnus jorullensis* Humboldt, Bonpland & Kunth (G. G. García et al., 2016). Entre las especies que más se utilizan en el comercio nacional, se encuentran algunas de las anteriormente mencionadas, siendo *P. pseudostrobus* Lindl., la especie de interés en este estudio. Las áreas de PFC que se muestrearon se encuentran en tres localidades: Tazaman (a) con coordenadas 19°26'31" N, 102°09'37" O, El Tejamanil 1 (b) con coordenadas 19°24'23" N, 102°09'57" O y El Tejamanil 2 (c) con coordenadas 19°24'54" N, 102°10'25" O.

3.2.2 Especie estudiada

Pinus pseudostrobus Lindl (Pinaceae) se distribuye ampliamente a lo largo de las tierras altas de 1600 a 3200 msnm en México y América Central en un amplio rango geográfico. En el área de estudio, los individuos reproductores pueden alcanzar hasta 40 m de altura con tallos muy rectos y hasta 100 cm de diámetro del tallo (Rzedowski & Calderón De Rzedowski, 2006; Sáenz-Romero et al., 2012). *P. pseudostrobus* se puede encontrar formando rodales de bosque de pino o bosque de pino-encino. Su madera es una de las mejores para la construcción y producción de celulosa para papel, contrachapados, muebles finos, artesanías y ebanistería (Hernández-Carmona et al., 2003), así como también, es una de las especies con mayor producción de resina (Rodríguez-Ortiz et al., 2020).

3.2.3 Muestreo

Se derribaron 60 árboles, los cuales fueron desramados, defoliados y divididos sus tallos en secciones comerciales, según los productos derivados de ellos. Se midieron los diámetros extremos, el grosor de la corteza y el largo del tronco para cada sección del fuste, posteriormente se pesaron en una balanza colgante de 300 kg, marca Modern Step, y se tomaron rodajas de muestra para secarlas. Las ramas de cada árbol se separaron en tres categorías; i) pequeñas (para a: 0.1 a 1.8 m, para b: 1.9 a 2.8 m, para c: 2.9 a 3.5 m), ii) medianas (para a: 1.81 a 2.65 m, para b: 2.81 a 3.8 m, para c: 3.51 a 4.5 m) y iii) grandes (para a: 2.66 a 3.7 m, para b: 3.81 a 4.75 m, para c: 4.51 a 5.6 m), según su longitud. De las ramas se tomaron tres muestras de cada una, sin hojas, de diámetro extremo, diámetro medio y se midió su longitud y luego se pesó con la balanza. Así mismo, las hojas obtenidas de cada rama muestreada se pesaron con la balanza. Por lo tanto, la muestra total de cada árbol consistió en rodajas de tallo, una porción de ramas (1 kg) y una porción de hojas (1 kg). Este material fue posteriormente llevado al laboratorio de preservación y secado de madera de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), donde fue sometido a procesos de secado en estufas industriales, construidas por el mismo laboratorio y que cumplen con los estándares nacionales, para su correcta operación. Las muestras fueron sometidas a temperaturas entre 60° C y 103°C durante 60 a 96 h, hasta alcanzar un 12% de humedad relativa, todo esto con el propósito de encontrar la densidad de la madera del tallo (DMT), rama (dR) y la densidad de las hojas (dH), para cada árbol muestreado.

3.2.4 Volumen y densidad de la madera

Para la obtención del volumen se utilizó, la ecuación (1), que corresponde al método seccional de Newton, dividiendo el largo total del fuste en 10 partes iguales, para las edades de a, b y c años respectivamente.

Ecuación 1. Volumen del fuste según Newton.

$$\text{Newton: } V_N = \frac{L}{6}(S_0 + 4S_m + S_l)$$

Donde,

V = Volumen.

L = Longitud del fuste o troza.

S_0 y S_l = Áreas de las secciones transversales extremas, mayor y menor, del fuste o troza, respectivamente.

S_m = Área de la sección transversal media del fuste o troza.

La densidad de la madera se obtuvo mediante el pesaje y secado de las muestras obtenidas en campo (3 rodajas por árbol), ramas y hojas. Las rodajas fueron sometidas al proceso de secado en estufa a una temperatura de 103° C, por un periodo de 96 h y las muestras de ramas y hojas con una temperatura de 60° C por un periodo de 48 h. De esta manera se obtuvo la densidad aparente (DA) para cada individuo, mediante la ecuación (2) que se muestra a continuación.

Ecuación 2. Densidad aparente de la madera.

$$DA = \frac{Dw}{Dv}$$

Donde,

DA = densidad aparente

Dw = peso seco

Dv = volumen seco

3.2.5 Biomasa aérea

La biomasa seca de cada componente hojas: ramas (Bhr) y de fuste (Bf) se obtuvo mediante la relación entre peso seco y peso fresco de las submuestras, que posteriormente se multiplicó por el volumen de la muestra correspondiente (Schlegel et al., 2000). La biomasa aérea total del árbol fue el resultado de la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste + corteza + ramas + follajes; Correia et al., 2010).

3.2.6 Carbono contenido

La biomasa de cada componente se multiplicó por el factor de carbono en la biomasa (ecuación 3), este factor corresponde a la fracción de carbono (%) en la biomasa seca de la madera, que posteriormente se transformó a contenido de carbono (ecuación 4); de acuerdo con (Figueroa-Navarro et al., 2005; Gayoso et al., 2002; IPCC, 2007).

Ecuación 3. Factor de carbono en la biomasa.

$$FCB = \frac{DA}{V_i}$$

Ecuación 4. Contenido de carbono.

$$CC = BM \times FCB$$

Donde,

FCB = Factor de carbono en biomasa

DA = Densidad aparente

V_i = Volumen de componente de árbol

CC = Contenido de carbono

BM = Biomasa total (Mg ha⁻¹)

CC = Contenido de carbono (Mg ha⁻¹)

Este proceso de cálculos se llevó a cabo para cada componente de árbol muestreado, en cada clase diamétrica de las edades evaluadas en esta investigación.

3.2.7 Modelos matemáticos evaluados

Una vez obtenidos los resultados de los parámetros deseados como son la biomasa y el CC, se procedió a evaluar modelos matemáticos (tabla 1), que estimen la biomasa en cada edad de las PFC de *P. pseudostrobus*, a partir del DN y la H, con excepción del modelo recomendado por (Gayoso et al., 2002) el cual tiene como única variable independiente el ND.

Tabla 3.1 Modelos utilizados para la estimación de biomasa de *P. pseudostrobus*, en plantaciones forestales comerciales de la CINSJP, occidente México. BM = Biomass; DN = normal diameter; H = Height of the stem; b_0, b_1, b_2, b_3 = regression parameters.

Modelo	Ecuación
<i>Schumacher-Hall</i>	$BM = b_0 ND^{b_1} H^{b_2}$
<i>Gayoso</i>	$BM = b_0 ND^{b_1}$
<i>Spurr - Combined variable</i>	$BM = b_0 + b_1 (ND^2 H)$
<i>Australian</i>	$BM = b_0 + b_1 ND + b_2 H + b_3 ND^2 H$
<i>Thornber</i>	$BM = b_0 \left(\frac{H}{ND}\right)^{b_1} (ND^2 H)$

BM = Biomasa aérea; ND = Diámetro normal; H = Altura; b_0, b_1, b_2, b_3 = parámetros de regresión.

3.3 Resultados

Los resultados que se presentan a continuación son valores promedios obtenidos de los cálculos por individuo dentro de cada CD, en las tres edades evaluadas (a, b y c), en las FCP de *P. pseudostrobus*, pertenecientes a la CISNP, los cuales se utilizaron en este estudio con la finalidad de tener la cuantificación de biomasa aérea y carbono contenido en cada plantación de diferente edad, para luego obtener un modelo de estimación matemática (entre los cinco modelos evaluados), que permita posteriormente realizar estimaciones rápidas, sencillas y confiables de los parámetros de interés.

3.3.1 Volumen

Los resultados de los volúmenes promedio obtenidos para cada edad, se muestran en la tabla S3.1 Suplementarios, en donde se aplicó el método de Newton de la ecuación 1. A continuación en la figura 3.1, se observan los valores promedio de V para cada una de las CD presentes en las tres edades evaluadas.

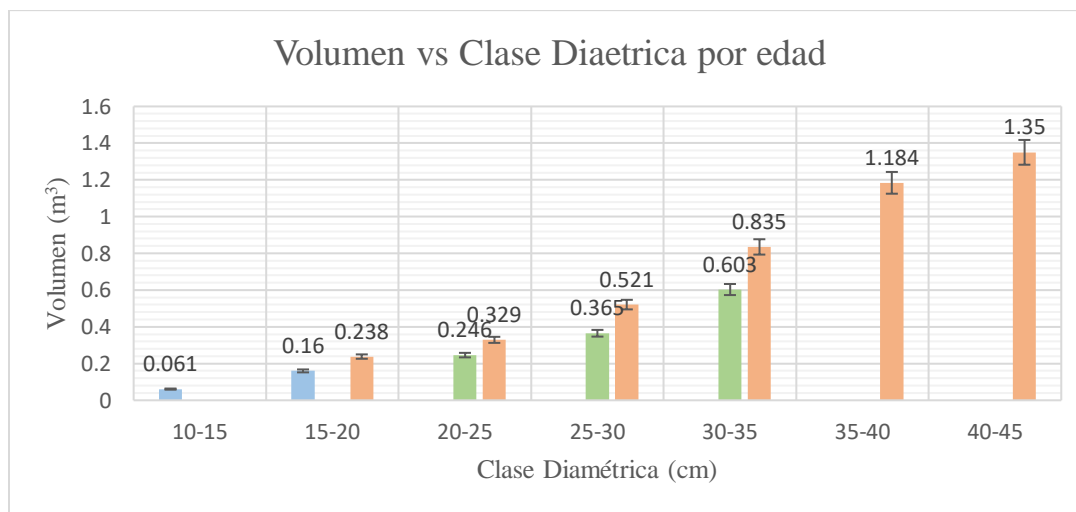


Figura 3.1 Volumen promedio para cada clase diamétrica. a: edad 10 con 2 CD; b: edad 15 con 3 CD; c: edad 20 con 6 CD; CD: Clase diamétrica; V: Volumen

Los volúmenes que se muestran en la figura 3.1, son valores promedios en cada clase diamétrica, que van de 10 a 45 cm, para cada edad evaluada. Las clases diamétricas de cada edad son: (a) contiene dos clases diamétricas de 10 a 15 y de 15 a 20cm; (b) contiene tres DC de 20 a 25, 25 a 30 y 30 a 35 cm; (c) contiene 6 clases diamétricas, que al igual que las anteriores están conformadas por rangos de 5 cm y van desde 15 a 45cm.

3.3.2 Densidad de la madera

La densidad aparente de la madera de los fustes de *P. pseudostrabus*, se obtuvo para cada clase diamétrica, contenida en cada una de las 3 edades evaluadas (10, 15 y 20 años) y los resultados obtenidos se muestran en la tabla S3.2 (suplementarios) y en la figura 3.2 que se muestra a continuación.

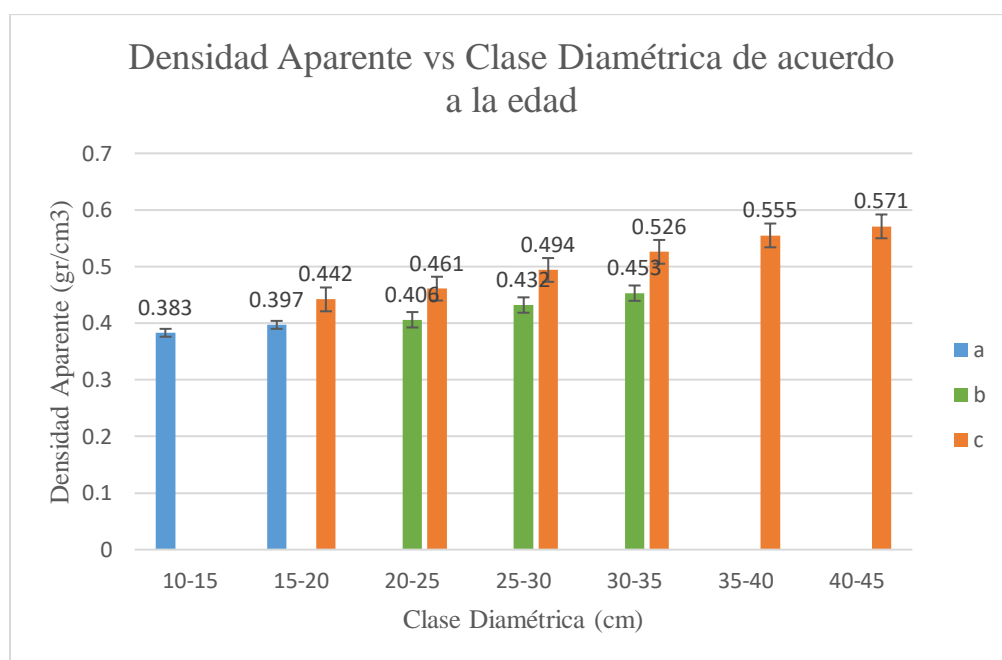


Figura 3.2 Densidad de la madera de *P. pseudostrabus*, en tres edades y distintas clases diamétricas. a: edad 10 con 2 CD; b: edad 15 con 3 CD; c: edad 20 con 6 CD; CD: Clase diamétrica; DA: Densidad aparente

Los resultados de densidad de la madera, de la especie objeto de estudio, varían según la edad y la clase diamétrica. Sin embargo, se puede observar que la edad c tiene algunas clases diamétricas, que están presentes en a y b, pero sus densidades de madera son diferentes, aunque sean de la misma clase diamétrica.

3.3.3 Biomasa aérea y carbono contenido

Para el cálculo de biomasa y contenido de carbono, se utilizó la densidad aparente de la madera (DA), así como el volumen promedio (V) de acuerdo con la clase diamétrica y a su edad, respectivamente. Los resultados de biomasa y contenido de carbono para *P. pseudostrobus*, se muestran en la tabla 3.2 y en la figura 3.3, que se presentan a continuación.

Tabla 3.2 Biomasa aérea y contenido de carbono, en PFC de *P. pseudostrobus*, con edades de 10, 15 y 20 años.

Edad	BM Aérea promedio para cada edad /ha					Resultados totales	
	BR	BH	BF	DE	CV	BM Mg ha ⁻¹	CC Mg ha ⁻¹
a	11.33	6.281	29.769	2.270	0.17	47.38	18.952
b	44.345	30.024	141.094	2.829	0.15	215.463	101.267
c	115.175	60.567	232.96	3.801	0.11	408.702	241.134

BR= biomasa de ramas; BH= biomasa de hojas; BF= biomasa de fuste; DE= desviación estándar; CV= coeficiente de variación; BM= biomasa aérea total (BR+BH+BF); CC/ha= carbono contenido por hectárea.

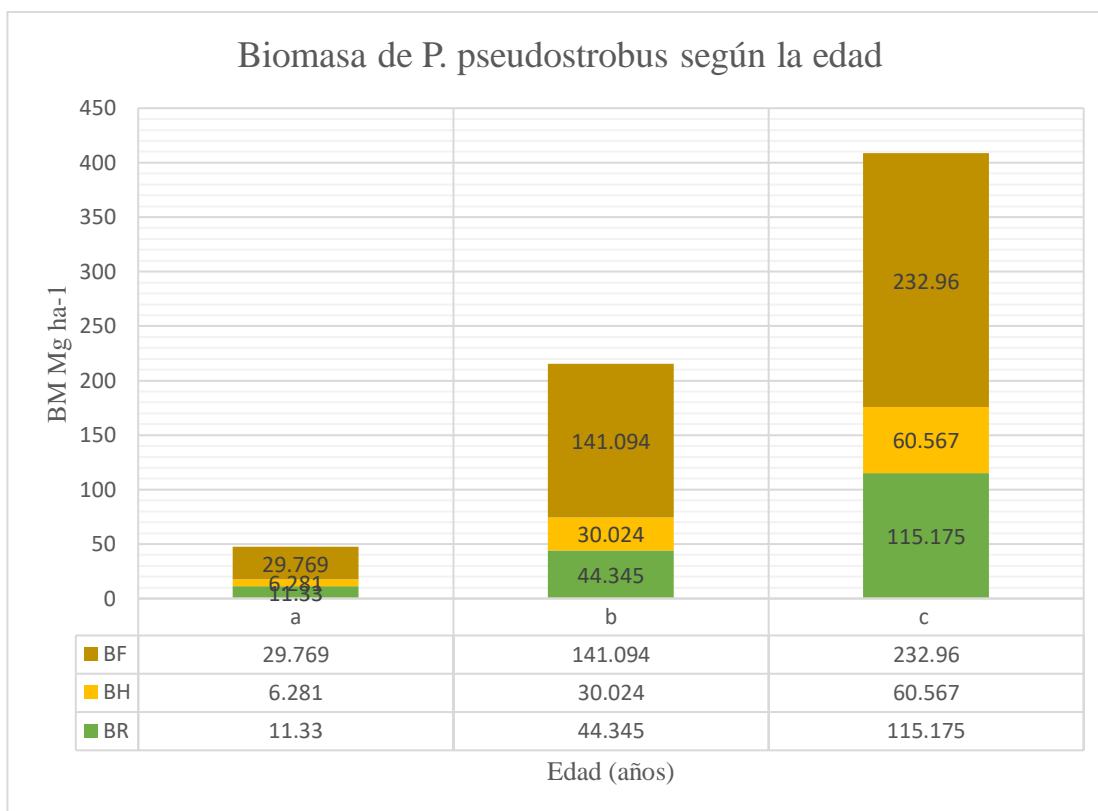


Figura 3.3 Resultados de la BM para las tres edades evaluadas de *P. pseudostrobus*. a: edad 10 con 2 CD; b: edad 15 con 3 CD; c: edad 20 con 6 CD; BR= biomasa de ramas; BH= biomasa de hojas; BF= biomasa de fuste; BM: Biomasa aérea

Los resultados de BM para cada edad en las PFC de *P. pseudostrobus*, aumenta considerablemente, entre rangos de edades, en este caso 5 años y se puede apreciar la diferencia del resultado entre las edades a y c, donde el valor obtenido para c es poco más del triple, que la BM de a. Del mismo modo el resultado de BM de c es 1.8 veces más que el resultado obtenido para b.

3.3.4 Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos evaluados, para la estimación de biomasa aérea, dieron resultados muy cercanos entre ellos con una alta correlación, respecto a los valores reales, con R^2_{adj}

entre 0.980 y 0.997. Siendo estrictos con la elección del modelo con mayor ajuste y estadísticos más significativos, tenemos los modelos resultantes en la tabla 3.3, para cada una de las edades y en la figura 3.4 se puede observar las líneas de tendencia de cada uno de los modelos y su comportamiento en cada edad.

Tabla 3.3 Modelos matemáticos de estimación de biomasa, para cada edad de la PFC de *P. pseudostrobus*.

Modelo	Edad	b0	b1	b2	b3	Ecuación
<i>Schumacher-Hall</i>	a	0.0192	1.9384	1.8864		BM = $0.0192ND^{1.9383}H^{1.8864}$
<i>Australian</i>	b	0.24242	-1.17039	-0.000702	0.32532	BM = $0.24242 - 1.17039ND - 0.000702H + 0.32532ND^2H$
<i>Schumacher-Hall</i>	c	0.5597	2.4093	0.8001		BM = $0.5597ND^{2.4093}H^{0.8001}$

BM = Biomasa aérea; ND = Diámetro normal; H = Altura; b₀, b₁, b₂, b₃= Parámetros de regresión.

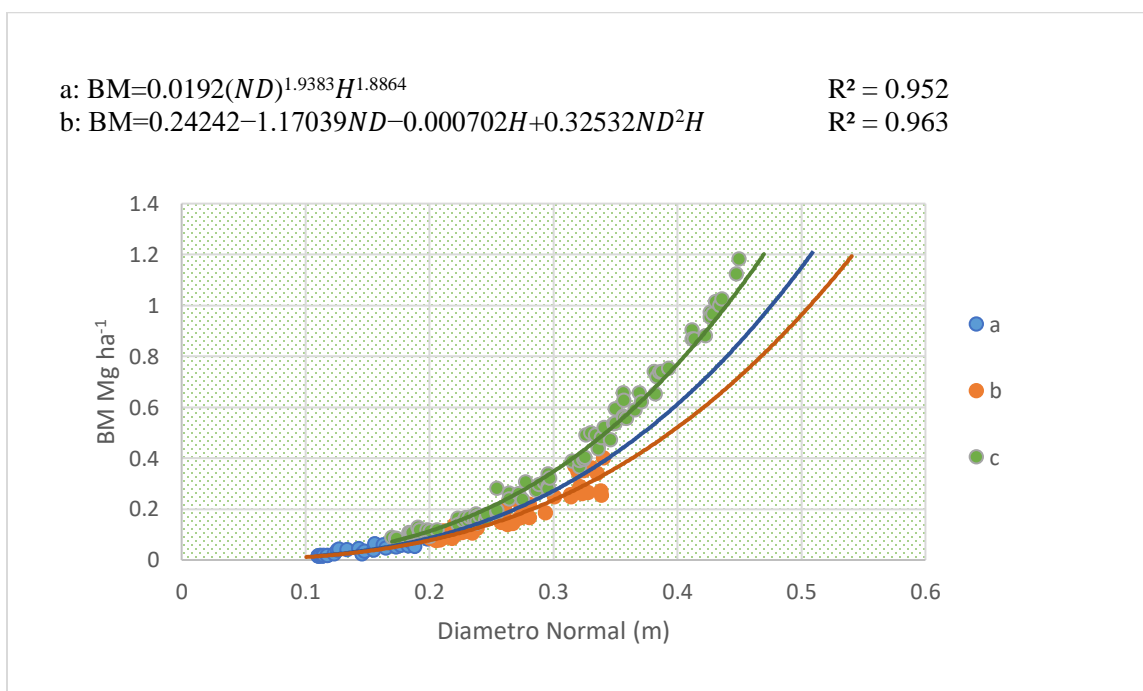


Figura 3.4 Modelos matemáticos resultantes, para la estimación de BM en cada edad evaluada.

a: edad 10; b: edad 15; c: edad 20; BM: Biomasa aérea; ND: Diámetro normal; H: Altura; R²: Coeficiente de determinación

De los cinco modelos matemáticos evaluados para la estimación de biomasa aérea, los modelos de Schumacher-Hall y el modelo Australiano, presentaron mayor precisión, respecto a los otros modelos. Sin embargo, el modelo matemático propuesto por Gayoso (2002), no estuvo tan alejado en sus resultados de estimación, respecto a los otros modelos (tabla S3 suplementarios), a pesar de contar con una sola variable independiente como es el ND, mientras que los otros modelos contienen dos variables independientes, que son el ND y la H.

Los parámetros estadísticos que se presentan a continuación en la tabla 4, corresponden a los resultados, de los modelos matemáticos que mejor ajuste presentaron, para cada edad de las CFP de *P. pseudostrobus*.

Tabla 3.4 Parámetros estadísticos de los modelos matemáticos, para la estimación de biomasa aérea, en cada edad evaluada para *P. pseudostrobus*.

Model	Edad	F	Var.	SEE	RMSE	CV%	R ² _{adj}	SW/K S
Schumacher - Hall	a	371.8	0.003	0.018	0.017	16.4	0.952	0.448
Australian	b	127.7	0.003	0.018	0.018	15.55	0.963	0.765
Schumacher - Hall	c	240.2	0.004	0.094	0.018	19.09	0.986	0.368

F= Estadístico de prueba; Var= varianza; SEE= Error estándar de estimación; RMSE= Raíz del error cuadrático medio; CV%= Coeficiente de variación; R^2 = R cuadrado; R^2_{adj} = R cuadrado ajustado; SW/KS= Shapiro Wilk y Kolmogorov Smirnov.

Todos los modelos matemáticos evaluados en este estudio presentaron un R^2_{adj} mayor a 0.9, aunque finalmente solo se eligieron para cada edad, el modelo que presentara el R^2_{adj} más elevado. Así mismo los parámetros estadísticos, como Var, SEE, RMSE y el CV%, presentaron valores bajos, indicando así, la idoneidad en la estimación de la biomasa aérea, mediante el uso de estos modelos.

3.4 Discusión

El promedio de la densidad aparente de la madera de *Pinus pseudostrobus*, en las PFC de la CISJNP, obtenida para cada edad fue de 0.39, 0.405 y 0.555 g/cm³, para edades de 10 (a), 15 (b) y 20 (c) años respectivamente. Esos resultados son similares a los reportados por (Sotomayor-Castellanos, 2016), quien realizó estudios de cambios de densidades en probetas de madera de la misma especie, obteniendo valores entre 0.44 y 0.51 g/cm³, utilizando como referencia la densidad básica reportada por Wright & Wessels (1992), cuyo valor es 0.406 g/cm³. En el presente estudio, la densidad aparente más cercana a lo reportado por Wright & Wessels (1992), fue la obtenida para la edad b con un valor de 0.405 g/cm³.

Las DA de madera obtenidas para las tres edades evaluadas, muestran una diferencia considerable entre ellas, aun cuando existen clases diamétricas que están presentes en edades distintas, como por ejemplo en la edad c, se encuentran seis clases diamétricas, de las cuales cuatro están presentes en las edades de a y b, la primera CD (10-15 cm), está presente en la edad de 10 años y tres CD (15-20; 20-25 y 25-30 cm), se encuentran en la edad b, sin embargo

las densidades son distintas y esto se debe a diversos factores: la diferencia de alturas del fuste, la cantidad de anillos de crecimiento, la disponibilidad de nutrientes y el ambiente en el que se encuentren (Cancino, 2012; Santos et al., 2019; Tlaxcala-Méndez et al., 2016), pero en este caso, principalmente la edad que es un factor que puede influir en las relaciones alométricas de las plantas (Geudens et al., 2004).

Las proporciones promedio de BHR (biomasa de hojarasca y ramas) y BF, para las edades evaluadas fueron de 27.3% y 72.7% para la edad a, 26.47 y 73.52% para la edad b y 26.55 y 73.44% para la edad c en *P. pseudostrobus*, que son valores que difieren a los reportados por (Návar et al., 2001), 36.3% y 64.5 % en *P. duranguensis* y 33.6% y 67.2 % en *P. cooperi*. Así mismo, se evidencian diferencias a los valores reportados por (Díaz-Franco et al., 2007) en *P. patula* 18.0 % en BHR y 82.0 % en BF, del mismo modo que (Pacheco-Escalona et al., 2007) trabajó con *P. greggii* y obtuvo proporciones de 49% y 51% en BHR y BF respectivamente. Teniendo en cuenta que el estudio actual tiene los valores calculados para cada edad y CD lo que hace que los resultados sean más precisos y específicos para las CFP de la CISJNP.

Sin embargo, existe una gran similitud con el trabajo de (Gayoso, 2001), quien reportó valores de 26.3% y 73.6 % en *P. radiata*. Estas diferencias se deben a la forma de crecimiento característico de cada especie y la dinámica de competencia entre individuos (Zobel & Talbert, 1988), así como las condiciones ambientales del sitio (Bazzaz et al., 2011).

La biomasa foliar (BH) fue levemente mayor a la biomasa de ramas (BR), en las edades evaluadas y ambos componentes aportaron entre 26.4 a 27.3 % de la biomasa total. Para la edad a ambos componentes tuvieron la mayor aportación (27.3%), esta proporción es similar

a las proporciones reportadas por (Xiao & Ceulemans, 2004) para *P. sylvestris* de 10 años, correspondientes a plantaciones jóvenes.

La mayor cantidad de biomasa aérea se concentró en el fuste (BF), lo cual es un comportamiento que ocurre normalmente en plantaciones jóvenes (Helmisaari et al., 2002; Reed & Tomé, 1998). La biomasa aérea total para cada edad fue superior a la reportada en otros estudios, por ejemplo, al comparar la edad a, se tienen estudios como los de Gayoso et al., (2002) donde reportaron 30.70 y 30.04 Mg ha⁻¹ para *P. radiata* y *P. ponderosa* de 7 y 8 años, respectivamente; (Oleksyn et al., 2008) obtuvieron 33.2 Mg ha⁻¹ para *P. sylvestris* de 12 años y 9.4 Mg ha⁻¹ para *P. contorta* de 13 años (Litton et al., 2003). Estos datos indican una productividad relativamente alta de *P. pseudostrobus*, comparada con estudios realizados en otras especies de pino. Lo anterior evidencia la importancia de tener en cuenta la edad de los árboles o de la plantación, facilitando así un seguimiento adecuado mediante el manejo forestal, que permiten la comparación de productividad con otras especies en CFP o en bosques naturales, con edades iguales.

En cuanto a estudios de biomasa, realizados en especies de pino tomando en cuenta la clase diamétrica, se tienen estudios como el de Díaz-Franco et al. (2007), con árboles de *P. patula* de 20 cm de diámetro donde obtuvo un valor de biomasa fustal (BF) de 113 kg, Návar et al., (2001) reportan 80.1 a 110.5 kg en especies del género *Pinus* y Méndez-González et al., (2011), reportaron 71.2 kg en *P. devoniana* y 122.1 kg en *P. pseudostrobus*. En el presente estudio la BF para la CD de 20 cm, fue de 108.24 kg para la edad b y 152.3 kg, para la edad c en *P. pseudostrobus* y estos valores dependen de la especie, la calidad del sitio, la competencia, el manejo aplicado y la densidad de siembra de los árboles (Cancino, 2012; Phiri et al., 2016; Veintimilla et al., 2019).

Los resultados obtenidos en cuanto a la relación entre la biomasa acumulada de los componentes del árbol y el contenido de carbono, denotan que las altas tasas de crecimiento y fijación de carbono aéreo registradas en esta plantación de *P. pseudostrobus*, tienen una adecuada combinación entre la producción de madera y celulosa, en comparación con otras especies de pinos, lo que puede ser aprovechable para la implementación de proyectos de mejoramiento genético, producción y secuestro de CO₂ según lo descrito por (Gamarra, 2001).

El contenido de carbono aéreo de esta plantación resultó ser similar a la proporción de 50 % que se maneja en lo general como concentración de carbono en el tejido vegetal (Brown & Kappelle, 2001; Megonigal & Schlesinger, 1997). La cantidad de carbono contenido en la parte aérea de las plantaciones de *P. pseudostrobus*, refleja un alto potencial de captación de carbono y, por tanto, una transferencia importante del CO₂ hacia la atmósfera, esto teniendo en cuenta lo planteado por Galicia et al., (2015) respecto a que las plantaciones jóvenes presentan tasas altas de crecimiento y por ello tienen una mayor capacidad para la captura de carbono.

La edad es el factor más importante para obtener resultados precisos y fiables cercanos a los valores reales de V. Esta declaración concuerda con respecto a las PPC orientadas a la producción de madera. También se encontró, que el modelo Schumacher-Hall se ajusta mejor a los 10 y 20 años, mientras que el australiano, que incluye la variable combinada: diámetro y altura (ND* H), era un mejor modelo para la edad 15. Esto indicó que cada modelo ajustó mejor la relación de ND y H, y puede estar relacionado con cambios en el crecimiento y las relaciones alométricas a lo largo del ciclo de vida de la especie (Akossou et al., 2013). Cumplir con los criterios para un mejor ajuste del modelo es de vital importancia a la hora de decidir la idoneidad de los modelos ya que, al fallar, la estimación de biomasa aérea y carbono contenido, será deficiente y las predicciones inexactas (Álvarez-

gonzález y Rojo-alboreca, 2007; García et al., 2016; García-Espinoza et al., 2019; Martínez-Angel et al., 2019; Uranga-Valencia et al., 2015). Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio muestran que es importante al realizar muestreos, categorizar en edades y clases diametrales al estimar variables necesarias como son el V y DA para la estimación de BM y CC, en futuras investigaciones en CFP y en bosques naturales donde es posible realizar análisis dendrocronológicos.

3.5 Conclusiones

En este estudio se determinó que para *Pinus pseudostrobus* Lindl, existen volúmenes (V) y densidades básicas de madera (d), que no dependen únicamente de la clase diamétrica (CD), sino que la edad, es el factor más importante en la obtención de resultados para las variables anteriormente mencionadas y del mismo modo afecta directamente a los valores de biomasa aérea (BM) y por ende al carbono contenido en una plantación forestal comercial (PFC), en este caso para la especie *P. pseudostrobus* Lindl.

Se demostró que la edad, es un factor importante, para la estimación de valores de interés, tanto en plantaciones forestales como en bosque natural, que se debe tener en cuenta para planes de manejo productivo y conservación de bosques, así como para la estimación precisa de biomasa y carbono contenido, lo que permitiría tener una visión más completa acerca de la producción de oxígeno y la transferencia de CO₂ hacia la atmósfera, en una masa forestal o en un rodal de determinada edad, independientemente de la especie arbórea que se maneje.

Los modelos matemáticos para la estimación de biomasa aérea, son una herramienta muy útil de fácil uso, ya que solo se requiere medir en campo el diámetro y la altura, para obtener el valor de BMA, en las plantaciones de *P. pseudostrobus* o cualquier otra especie a

la cual se le realice un estudio de ajuste de estos modelos, que en este caso resultaron mucho más precisos, los modelos de Schumacher Hall (para edades 10 y 20 años) y el modelo Australiano (edad 15 años), generando un mayor rendimiento en las tareas de inventario y análisis de coberturas boscosas para la obtención de contenido de carbono, sin la necesidad de llevar muestras a laboratorio o hacer muestreos destructivos, generando una eficiencia en la sustentabilidad de los bosques y su materia prima.

3.6 Referencias

- Akossou, A. Y. J., Arzouma, S., Attakpa, E. Y., Fonton, N. H., & Kokou, K. (2013). Scaling of teak (*tectona grandis*) logs by the xylometer technique: Accuracy of volume equations and influence of the log length. *Diversity*, 5(1), 99–113. <https://doi.org/10.3390/d5010099>
- Álvarez-gonzález, J. G., & Rojo-alboreca, R. R. A. (2007). Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuadernos de la SECF* (23).
- Bazzaz, F. A., Coleman, J. S., & Morse, S. R. (2011). Growth responses of seven major co-occurring tree species of the northeastern United States to elevated CO₂. *Https://Doi.Org/10.1139/X90-195*, 20(9), 1479–1484. <https://doi.org/10.1139/X90-195>
- Bloomberg, M., Mason, E. G., Jarvis, P., & Sedcole, R. (2008). Predicting seedling biomass of radiata pine from allometric variables. *New Forests*, 36(1), 103–114. <https://doi.org/10.1007/S11056-008-9086-7>
- Blujdea, V. N. B., Pilli, R., Dutca, I., Ciuvat, L., & Abrudan, I. v. (2012). Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania. *Forest Ecology and Management*, 264, 172–184. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2011.09.042>
- Brown, A. D., & Kappelle, M. (2001). Bosques nublados del neotrópico introducción a los bosques nublados del neotrópico: una síntesis regional. *Bosques Nublados Del Neotropico*, 25–40.
- Cancino, J. O. (2012). *Dendrometría básica* (Universidad de Concepción, Ed.). Departamento de Bosques y Medio Ambiente.
- Correia, A. C., Tomé, M., Pacheco, C. A., Faias, S., Dias, A. C., Freire, J., Carvalho, P. O., & Pereira, J. S. (2010). *View of Biomass allometry and carbon factors for a Mediterranean pine (Pinus pinea L.) in Portugal.* Forest Systems. <https://revistas.inia.es/index.php/fs/article/view/1464/1374>

- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *25 Madera y Bosques*, *13*(1), 25–34.
- Dixon, R. K., Winjum, J. K., Andrasko, K. J., Lee, J. J., & Schroeder, P. E. (1994). Integrated land-use systems: Assessment of promising agroforest and alternative land-use practices to enhance carbon conservation and sequestration. *Climatic Change*, *27*(1), 71–92. <https://doi.org/10.1007/BF01098474>
- FAO. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010 - Main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/publications/card/es/c/e4fa9d60-5207-5a96-976c-cd2e6f3519a5/>
- Figueroa-Navarro, C., Etchevers-Barra, J. D., Velázquez-Martínez, A., & Acosta-Mireles, M. (2005). concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la sierra norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, *23*(1), 57–64. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57323108.pdf>
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, Y. J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *ECOLOGÍA Botanical Sciences*, *93*(3), 473–484. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>
- Gamarra, J. (2001). *Estimación del contenido de carbono en plantaciones de eucalyptus globulus labill, en junin, Perú*. Simposio Internacional de Medición y Captura de Carbono En Ecosistemas Forestales. <https://docplayer.es/14965064-Estimacion-del-contenido-de-carbono-en-plantaciones-de-eucalyptus-globulus-labill-en-junin-peru-ing-for-juan-gamarra-ramos.html>
- García, G. G., García-Magaña, J., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, J., & García-Cuevas, H. (2016). Precisión de los coeficientes y cocientes de forma en la estimación del volumen de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *7*, 19–36. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63448564003>
- García, G., Jesús, J., Magaña, G., Ramos, J. H., Jesús, H., Flores, M., Cuevas, X. G., & Ramos, A. H. (2016). Accuracy of form coefficients and quotients in estimating the volume of *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *7*(35), 19–36.
- García-Espinoza, G. G., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Martínez-Ángel, L., García-Magaña, J. J., & Hernández-Ramos, J. (2019). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial de *Pinus pseudostrobus* lindl. en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Agrociencia*, *53*(1), 115–131. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1755>
- Gayoso, J. (2001). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana*, *1*(1), 1–13. <http://www.forest.ula.ve/rforibam/archivos/DOC1.pdf>

- Gayoso, J., Guerra, J., & Alarcón, D. (2002). Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. *Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile*, 1–157.
- Geudens, G., Staelens, J., Kint, V., Goris, R., & Lust, N. (2004). Allometric biomass equations for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings during the first years of establishment in dense natural regeneration. *Ann. For. Sci.*, 61, 653–659. <https://doi.org/10.1051/forest:2004067>
- Helmisaari, H. S., Makkonen, K., Kellomäki, S., Valtonen, E., & Mälkönen, E. (2002). Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 165(1–3), 317–326. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00648-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00648-X)
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007 Equipo de redacción principal Equipo de redacción principal OMM PNUMA. *IPCC*, 1–104. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf
- Jackson, M. M., Turner, M. G., Pearson, S. M., & Ives, A. R. (2012). Seeing the forest and the trees: multilevel models reveal both species and community patterns. *ECOSPHERE*, 3(9), 1–16. <https://doi.org/10.1890/ES12-00116.1>
- Litton, C. M., Ryan, M. G., Knight, D. H., & Stahl, P. D. (2003). Soil-surface carbon dioxide efflux and microbial biomass in relation to tree density 13 years after a stand replacing fire in a lodgepole pine ecosystem. *Global Change Biology*, 9(5), 680–696. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2486.2003.00626.X>
- Lugo, A. E., & Brown, S. (1992). Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. *Forest Ecology and Management*, 54(1–4), 239–255. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90016-3)
- Martínez-Angel, L., de los Santos-Posadas, H. M., Fierros-González, A. M., Cruz-Cobos, F., Quiñonez-Barraza, G. (2019). Funciones compatibles de ahusamiento y volumen en una plantación forestal comercial de *Pinus chiapensis* (martínez) andresen en Tlatlauquitepec, Puebla. *Agrociencia*, 53(3), 381–401. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1791>
- Megonigal, J. P., & Schlesinger, W. H. (1997). Enhanced CH₄ emission from a wetland soil exposed to Elevated CO₂. *Biogeochemistry*, 37(1), 77–88. <https://doi.org/10.1023/A:1005738102545>
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. A., & Nájera-Luna, A. (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*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000400007
- Návar, J., Nájera, J., & Jurado, E. (2001). Preliminary estimates of biomass growth in the Tamaulipan thornscrub in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 47(3), 281–290. <https://doi.org/10.1006/JARE.2000.0708>

- Oleksyn, J., Reich, P. B., Chalupka, W., & Tjoelker, M. G. (2008). Differential Above- and Below-ground Biomass Accumulation of European *Pinus sylvestris* Populations in a 12-year-old Provenance Experiment. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/02827589908540804*, 14(1), 7–17. <https://doi.org/10.1080/02827589908540804>
- Ordóñez Díaz, A. J., Rivera Vázquez, B. E., Medina Tapia, E. M., & Hernández Ahedo R. L. (2015). Carbon content and its potential sequestration in the forest biomass of San Pedro Jacuaro, Michoacán State. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7–16. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322015000600007&script=sci_arttext&tlng=en
- Ortega, U., Kindelman, A., Hevia, A., Álvarez, E., & Majada, J. (2006). Información agroforestal 23 Boletín informativo del SERIDA-n.º 3. *Información Agroforestal*, 3, 23–28. <http://www.serida.org/pdfs/01521.pdf>
- Pacheco-Escalona, F. C., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., Fierros-González, A. M., Cetina-Alcalá, V. M., & Vaquera-Huerta, H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Fitotec.* <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/1018/961>
- Phiri, D., Phiri, E., Kasubika, R., Zulu, D., & Lwali, C. (2016). The implication of using a fixed form factor in areas under different rainfall and soil conditions for *Pinus kesiya* in Zambia. *Http://Dx.Doi.Org/10.2989/20702620.2015.1108614*, 78(1), 35–39. <https://doi.org/10.2989/20702620.2015.1108614>
- Reed, D., & Tomé, M. (1998). Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management*, 103(1), 21–32. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00174-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00174-6)
- Rodríguez-Ortiz, G., Aragón-Peralta, R. D., Enríquez-del Valle, J. R., Hernández-Hernández, A., Santiago-García, W., & Campos-Angeles, G. v. (2020). Calidad de plántula de progenies selectas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* del sur de México. *Interciencia*, 45(2), 96–101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33962521007>
- Rzedowski, J., & Calderón De Rzedowski, G. (2006). Redalyc.Dos especies nuevas de bursera (burseraceae) de México. *Acta Botanica Mexicana*, 74, 169–178. <https://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n74/n74a3.pdf>
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Soto-Correa, J. C., Aguilar-Aguilar, S., Zamarripa-Morales, V., & López-Upton, J. (2012). Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México. two location shadehouse test results. *Artículo Científico Rev. Fitotec. Mex*, 35(2), 111–120.
- Santos, M. F. dos, Filho, A. F., Gama, J. R. V., Retslaff, F. A. de S., Costa, D. L. da, Gomes, K. M. A., Cruz, G. da S., & de Almeida, B. R. S. (2019). Eficiência de equações volumétricas para manilkara spp. em floresta manejada na amazônia oriental. *Nativa*, 7(5), 621–628. <https://doi.org/10.31413/NATIVA.V7I5.7804>

- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. *Universidad Austral De Chile*, 1(1), 1–17. https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Manual_de_procedimiento_para_inventarios_de_carbono_en_ecosistemas_forestales.pdf
- Sotomayor-Castellanos, J. (2016). *Módulo dinámico de la madera de Pinus pseudostrobus. Evaluación por vibraciones transversales.* | Javier-Ramón Sotomayor Castellanos - Academia.edu. Investigación En Ingeniería de La Madera. https://www.academia.edu/28150638/M%C3%B3dulo_din%C3%A1mico_de_la_madera_de_Pinus_pseudostrobus._Evaluaci%C3%B3n_por_vibraciones_transversales
- Takahashi, K., & Obata, Y. (2013). Growth, allometry and shade tolerance of understory saplings of four subalpine conifers in central Japan. *Journal of Plant Research*, 127(2), 329–338. <https://doi.org/10.1007/S10265-013-0610-2>
- Tlaxcala-Méndez, R. M., de los Santos-Posadas, H. M., Hernández-de la Rosa, P., & López-Ayala, J. L. (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia* 50(1), 89–105. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000100089&script=sci_arttext
- Uranga-Valencia, L. P., de Los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., López-Upton, J., & Navarro-Garza, H. (2015). Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque total volume and taper for *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. AT THREE FOREST CONDITIONS. *Agrociencia*, 49, 787–801.
- Veintimilla, D., Ngo Bieng, M. A., Delgado, D., Vilchez-Mendoza, S., Zamora, N., & Finegan, B. (2019). Drivers of tropical rainforest composition and alpha diversity patterns over a 2,520 m altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9(10), 5720–5730. <https://doi.org/10.1002/ECE3.5155>
- Velázquez, A., Bocco, G., Torres, A., Lopez, A. C., & Gómez, F. A. (2015). Indigenous Community of Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, Mexico. *Forest Plans of North America*, 169–175. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799936-4.00020-5>
- Wright, J. A., & Wessels, A. (1992). Laboratory scale pulping of *Pinus pseudostrobus*, *P. maximinoi* and *P. patula*. *IPEF International*, 2, 39–44. <https://www.ipef.br/publicacoes/international/nr02cap06.pdf>
- Xiao, C.-W., & Ceulemans, R. (2004). Allometric relationships for needle area of different needle age classes in young Scots pines: needles, branches and trees. In *Forestry* (Vol. 77, Issue 5). <https://academic.oup.com/forestry/article/77/5/369/664581>
- Zobel, B., & Talbert, J. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales* (Limusa, Ed.; Limusa). Limusa.

4. CAPITULO IV: Discusión General

4.1 Discusión General

En la realización de este estudio, se evidenciaron las necesidades que tiene y las condiciones que requiere una plantación forestal comercial (PFC), para su pleno desarrollo y competitividad frente a estándares comerciales nacionales e internacionales, que cubren las exigencias del mercado y las preferencias de diversos clientes. Las variaciones en clases diamétricas (CD), factor de forma (FF) y Volumen (V), encontradas en la edad de 20 años, demuestran que hace falta cumplir rigurosamente un plan de manejo forestal en las PFC de *P. pseudostrobus* pertenecientes a la CINSJP, la poda, fertilización y aclareo, deberán realizarse en el tiempo y forma establecidos en el plan de manejo para evitar la presencia de clases diamétricas menores que no deberían estar presentes en determinada edad o árboles que no correspondan con la edad de la plantación (Santos et al., 2019; Subiakto et al., 2016). Las actividades adecuadas de gestión forestal llevadas a cabo en las PFC generalmente garantizan mejores estimaciones del FF en comparación con las de los bosques naturales (Orozco, 2008).

En este estudio, se obtuvo un valor promedio de FF de 0.506 (SE \pm 0.01) para *P. pseudostrobus*, mayor o similar en comparación con otros estudios como los de Uranga-Valencia et al. (2015), quienes obtuvieron un FF entre 0.447 y 0.506 para *P. patula* en tres regiones diferentes de México. Otros estudios con especies de *Pinus* en otros países han obtenido valores entre 0,47 y 0,57 (Dávila Molina, 2017; Jacobs et al., 2019; Phiri et al., 2016). En investigaciones previas en la misma área que se desarrolló este estudio, pero en bosque natural de *P. pseudostrobus*, García-Espinoza et al. (2019) encontraron un FF promedio de 0.46 (SE \pm 0.03), mostrando que el bosque manejado presenta mejores parámetros para la estimación de V y FF.

Las variaciones en CD, FF, V, altura (H) y biomasa aérea (BM), que pueden presentarse en una plantación forestal de la misma edad, se produce porque el crecimiento de un árbol, depende de factores como la posición del tallo en el bosque, la disponibilidad de nutrientes, el estado de salud del individuo y el microambiente donde se establece el árbol (luz, disponibilidad de agua, etc.) (Prodan et al., 1997; Subiakto et al., 2016). Este estudio, reportó una gran variación en el tamaño, tanto en diámetro como en altura, en *P.*

pseudostrobus, dentro de la misma edad, especialmente para individuos de 20 años, donde se encontraron hasta seis clases diamétricas, en árboles que tienen un rango de 16.9-44.9 cm de diámetro normal y una altura de 17.9-28.3 m, los cuales se encuentran dentro del rango reportado por los trabajos de García-Espinoza et al., (2019), Tlaxcala-Méndez et al. (2016) y Veintimilla et al. (2019).

Los estudios forestales son una herramienta esencial para la cuantificación de existencias forestales, cantidad de especies e individuos por especie, volumen de madera, contenido de biomasa y estado de los bosques, ya sean naturales o PFC y según el tipo de muestreo aplicado pueden obtenerse resultados específicos, dependiendo de las necesidades que el estudio pretenda cubrir (Cancino, 2012; Prodan et al., 1997). En este estudio se utilizaron los muestreos destructivos y no destructivos, para obtener los valores de FF, V, BM y carbono contenido (CC). Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las estimaciones en *P. pseudostrobus* de V y FF basadas en un método no destructivo (media V SE: $0,532 \text{ m}^3 \pm 0,026$; media FF_{0,1H} SE: $0,507 \pm 0,013$), fueron muy similares a las estimaciones obtenidas de los métodos destructivos (media V SE: $0,534 \text{ m}^3 \pm 0,027$; media FF_{0,1H} SE: $0,506 \pm 0,011$; como se muestran en el capítulo 2, Cuadro 2 y Cuadro S1). En cuanto a la estimación de BM y CC, se realizó mediante el muestreo destructivo, tal como se mostró en el capítulo 3, sin embargo, se tomaron muestras no destructivas en los fustes, con el taladro de Pressler, obteniendo valores de densidad aparente de la madera (DA) y BM, con diferencias no significativas, con respecto a los resultados obtenido mediante el muestreo destructivo (resultados en suplementarios S3.3). De ahí que, este estudio recomienda ampliamente, el uso del método de muestreo no destructivo para estimar V, FF, DA y BM en PFC de *P. pseudostrobus* con el fin de garantizar la sostenibilidad de los recursos forestales y naturales que CPF proporciona. Por lo tanto, los métodos no destructivos emergen como la mejor opción para una estimación más rápida de V, ya que no es necesario talar árboles, aunque se requieren estimaciones precisas.

Al no presentar diferencias estadísticamente significativas entre los métodos destructivos y no destructivos abre muchas posibilidades para determinar los factores que pueden incidir en la variabilidad en V, FF, DA y BM entre las CD. Por lo tanto, basados en

los resultados de este estudio, tanto lo visto en el capítulo 2 como en el capítulo 3, se confirma que la edad es un factor muy determinante para obtener resultados precisos y fiables cercanos a los valores reales de V, BM y CC. Esta afirmación concuerda con Talita et al. (2018), respecto a las PFC orientadas a la producción de madera. También encontramos que los modelos para la estimación de volumen, como Schumacher-Hall se ajusta mejor a las plantaciones de *P. pseudostrobus* de 10 y 15 años, con R^2_{adj} de 0.896 y 0.986 respectivamente. Mientras que el modelo australiano, que incluye la variable combinada; diámetro normal y altura (DN*H), fue un mejor modelo para 20 años y para la AGM presentando un R^2_{adj} de 0.992 y 0.909 respectivamente, lo que concuerda con estudios del género *Pinus* reportados por Corral-Rivas et al. (2017); Cruz-Cobos et al., (2007); García et al., (2016); García-Espinoza et al., (2019); Talita et al., (2018); Woodall et al., (2010). En cuanto a los modelos matemáticos para la estimación de biomasa, el modelo Schumacher-Hall se ajusta mejor a las plantaciones de 10 y 20 años con valores de R^2_{adj} de 0.952 y 0.986 respectivamente, por otro lado el modelo australiano, fue el que mejor se ajustó para las plantaciones de 15 años con un R^2_{adj} de 0.963, estos valores y modelos muestran similitud a los valores reportados por Boca et al., (2017); Carrillo Anzures et al. (2016); Díaz-Franco et al., (2007); Pacheco-Escalona et al., (2007), con diferentes especies del género *Pinus*.

Las DA de madera obtenidas para las tres edades evaluadas, fueron notablemente diferentes entre cada edad, esto se debe principalmente a que la edad es uno de los factores más influyentes en las relaciones alométricas de los individuos de un bosque (Geudens et al., 2004), aún cuando la edad de 20 años, contiene seis CD, de las cuales las primeras cuatro, se presentan también en las edades de 10 y 15 años, pero las DA son distintas y esto se debe a diversos factores como pueden ser la diferencia de alturas del fuste, la cantidad de anillos de crecimiento, la disponibilidad de nutrientes y el ambiente en el que se encuentren (Cancino, 2006; Tlaxcala et al., 2016; Santos et al., 2019). Los resultados, de DA promedio de la madera de *P. pseudostrobus*, en las PFC de 10, 15 y 20 años, pertenecientes a la CISJNP, obtenida para cada edad fue de 0.39, 0.405 y 0.555 g/m³, respectivamente, valores que se encuentran dentro de los rangos reportados por Sotomayor-Castellanos, (2016) y Wright & Wessels, (1992). Sin embargo los estudios realizados por los autores anteriormente mencionados, no tuvieron en cuenta la edad de los individuos de los que procedían las muestras que evaluaron,

lo cual hace que el presente estudio, ofrezca valores de DA más acertados ya que se tuvo en cuenta la edad de las plantaciones donde se extrajeron las muestras.

Los resultados obtenidos de BM en PFC de *P. pseudostrabus* son satisfactorios y se encuentran en rangos acordes a la edad de cada plantación muestreada en este estudio, aunque las proporciones promedio de biomasa de hojarasca y ramas (BHR) y biomasa fustal (BF), son valores que difieren a los reportados por Díaz-Franco et al. (2007); Návar et al. (2001); Pacheco-Escalona et al., (2007), quienes trabajaron con diferentes especies del género *Pinus*. Estas diferencias se deben a la forma de crecimiento característico de cada especie y la dinámica de competencia entre individuos (Zobel & Talbert, 1988), así como las condiciones ambientales del sitio (Bazzaz et al., 2011). Sin embargo, los resultados mostraron una gran similitud con el trabajo de (Gayoso, 2001), en *P. radiata* y de quien se evaluó su modelo matemático para la estimación de BM en el presente estudio, a pesar de que, en los resultados finales de modelos evaluados, este no salió favorecido, siendo superado en ajuste por los modelos de Schumacher Hall y el modelo australiano.

En este estudio se reportó que la mayor cantidad de BM se concentra en el fuste (BF), lo cual es un comportamiento que ocurre normalmente en plantaciones jóvenes (Helmisaari et al., 2002; Reed & Tomé, 1998). La BM total para cada edad, fue superior a la reportada en otros estudios, como Gayoso et al. (2002); Litton et al. (2003); Oleksyn et al. (2008). Estos datos indican una productividad relativamente alta, en las PFC de *P. pseudostrabus* de la CINSJP, siendo esto normal, tratándose de una plantación que está bajo un esquema de manejo forestal sostenible, pero que todavía faltan detalles por afinar en el manejo de las plantaciones en cuanto a las podas, raleos y fertilización, con lo que, la producción de madera y los valores de CC, serían mayores a los existentes actualmente.

Las ventajas de contar con modelos matemáticos para la estimación de V y BM, específicos para cada edad es que permiten realizar levantamientos de monitoreo en cada sitio de la plantación, sin necesidad de realizar un muestreo destructivo, ya que estos modelos matemáticos ofrecen estimaciones de V y BM, muy cercanas a las reales, siendo que sus variables son de fácil medición. De ahí que, no requerir muestreo destructivo para tener valores óptimos de V y BM, permite la adecuada gestión y sostenibilidad de los bosques, y en consecuencia, monitorizar las cantidades de carbono almacenadas tanto en bosques

plantados como naturales y discriminando según edades de plantación, clases de diámetro u otras variables de interés para la gestión y conservación forestal.(Vásquez-Bautista et al., 2016; West, 2009). Basados en los resultados obtenidos en este estudio, la CINSJP puede establecer objetivos para la conservación y el manejo forestal tanto en las PFC como en el bosque natural, para mejorar la calidad forestal, a través del monitoreo constante mediante el uso de estudios forestales.

4.2 Conclusiones

La especie forestal de *P. el pseudostrobus* es uno de los recursos forestales más importantes de México. Específicamente, para el CINJSP, representa la mejor especie para la producción de madera y resina de la cual la comunidad obtiene sus ganancias más importantes. Se espera que este estudio pueda contribuir a una estimación rápida y precisa del volumen y el factor de forma en general y servir como guía a la comunidad para realizar mejores prácticas de manejo forestal. Así mismo, se sugiere seguir rigurosamente el plan de manejo forestal, especialmente en relación con la fertilización, poda y aclareo para obtener mejor volumen, mejor rentabilidad y sostenibilidad del bosque.

Los modelos matemáticos para la estimación de volumen de madera y biomasa aérea, resultantes en este estudio, son una herramienta muy útil de fácil uso, ya que solo se requiere medir en campo el diámetro y la altura, para obtener los valores de V de BM, en las plantaciones de *P. pseudostrobus* o cualquier otra especie a la cual se le realice un estudio forestal ya sea con fines de conservación y protección o para el aprovechamiento doméstico o commercial. Los modelos que presentaron un mayor ajuste en la estimación de volumen y biomasa, fueron el modelo de Schumacher Hall y el modelo Australiano, lo que permite a este estudio recomendar el uso de estos modelos, generando así, un mayor rendimiento en las tareas de inventario y análisis de coberturas boscosas para la obtención de cantidades de madera y el contenido de carbono existentes en un bosque de *P. pseudostrobus*, sin la necesidad de realizar muestreos destructivos y de esta manera, contribuyendo a generar mayor eficiencia en la sustentabilidad de los bosques y su materia prima.

Así mismo, los resultados obtenidos en el presente estudio, demuestran que la edad, es un factor muy importante, para la estimación de valores de interés, tanto en plantaciones forestales como en bosque natural, que afecta directamente características físicas de la madera, tales como la densidad de la madera, el diámetro, el factor de forma, la altura y en consecuencia el volumen, la biomasa y el carbono contenido en el área forestal que se esté evaluando, de ahí que la edad de los árboles, es un factor que debe ser tenido en cuenta para planes de manejo productivo y conservación de bosques, así como para la estimación precisa de biomasa y carbono contenido, lo que permitiría tener una visión más completa acerca de la producción de oxígeno.

4.3 Referencias

- Bazzaz, F. A., Coleman, J. S., & Morse, S. R. (2011). Growth responses of seven major co-occurring tree species of the northeastern United States to elevated CO₂. *https://doi.org/10.1139/X90-195*, 20(9), 1479–1484. <https://doi.org/10.1139/X90-195>
- Boca, T., Fassola, H., Crechi, E., Barth, S., Keller, A., Winck, R., & Ferrere, P. (2017). Modelos aditivos de predicción de biomasa aérea de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de Misiones Argentina Additive models for predicting biomass of *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* en Misiones Argentina. *Quebracho*, 25(1,2), 5–15.
- Cancino, J. O. (2012). *Dendrometría básica* (Universidad de Concepción, Ed.). Departamento de Bosques y Medio Ambiente.
- Carrillo Anzures, F., Acosta Mireles, M., Jiménez Cruz, C., González Molina, L., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México* Allometric equations for estimating biomass and carbon from the aerial part of *Pinus hartwegii* in Ixta-Popo National Park, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 681–691. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n3/2007-0934-remexca-7-03-681-en.pdf>
- Corral-Rivas, J. J., Vega-Nieva, D. J., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sánchez, C. A., Wehenkel, C., Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). Compatible System for Predicting Total and Merchantable Stem Volume over and under Bark, Branch Volume and Whole-Tree Volume of Pine Species. *Forests*, 8(11), 417. <https://doi.org/10.3390/F8110417>

- Cruz-Cobos, F., de Los Santos-Posadas, H. M., & René Valdez-Lazalde, J. (2007). Compatible Taper-Volume System For *Pinus Cooperi* Blanco In Durango, México. *Agrociencia*, 42, 473–485.
- Dávila Molina, D. E. (2017). *Estimación de volumen y forma para fustes de árbol de seis especies tropicales de bosque Andino de Colombia TESIS*. 1–100.
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *25 Madera y Bosques*, 13(1), 25–34.
- García, G. G., García-Magaña, J., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, J., & García-Cuevas, H. (2016). Precisión de los coeficientes y cocientes de forma en la estimación del volumen de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7, 19–36. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63448564003>
- García-Espinoza, G. G., Aguirre-Calderón, O. A., Vargas-Larreta, B., Martínez-Ángel, L., García-Magaña, J. J., & Hernández-Ramos, J. (2019). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial de *Pinus pseudostrobus* lindl. en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Agrociencia*, 53(1), 115–131. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1755>
- Gayoso, J. (2001). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 1–13. <http://www.forest.ula.ve/rforibam/archivos/DOC1.pdf>
- Gayoso, J., Guerra, J., & Alarcón, D. (2002). Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. *Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile*, 1–157.
- Geudens, G., Staelens, J., Kint, V., Goris, R., & Lust, N. (2004). Allometric biomass equations for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings during the first years of establishment in dense natural regeneration. *Ann. For. Sci*, 61, 653–659. <https://doi.org/10.1051/forest:2004067>
- Helmisaari, H. S., Makkonen, K., Kellomäki, S., Valtonen, E., & Mälkönen, E. (2002). Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 165(1–3), 317–326. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00648-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00648-X)
- Jacobs, M., Rais, A., & Pretzsch, H. (2019). Analysis of stand density effects on the stem form of Norway spruce trees and volume miscalculation by traditional form factor equations using terrestrial laser scanning (TLS). *50(1)*, 51–64. <https://doi.org/10.1139/CJFR-2019-0121>
- Litton, C. M., Ryan, M. G., Knight, D. H., & Stahl, P. D. (2003). Soil-surface carbon dioxide efflux and microbial biomass in relation to tree density 13 years after a stand replacing fire in a lodgepole pine ecosystem. *Global Change Biology*, 9(5), 680–696. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2486.2003.00626.X>

- Návar, J., Nájera, J., & Jurado, E. (2001). Preliminary estimates of biomass growth in the Tamaulipan thornscrub in north-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 47(3), 281–290. <https://doi.org/10.1006/JARE.2000.0708>
- Oleksyn, J., Reich, P. B., Chalupka, W., & Tjoelker, M. G. (2008). Differential Above- and Below-ground Biomass Accumulation of European *Pinus sylvestris* Populations in a 12-year-old Provenance Experiment. *14*(1), 7–17. <https://doi.org/10.1080/02827589908540804>
- Orozco, S. J. (2008). Forest Fire Risk Model For Michoacan, Mexico.
- Pacheco-Escalona, F. C., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., Fierros-González, A. M., Cetina-Alcalá, V. M., & Vaquera-Huerta, H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus Greggii Engelm.* *Fitotec.* <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/1018/961>
- Phiri, D., Phiri, E., Kasubika, R., Zulu, D., & Lwali, C. (2016). The implication of using a fixed form factor in areas under different rainfall and soil conditions for *Pinus kesiya* in Zambia. *78*(1), 35–39. <https://doi.org/10.2989/20702620.2015.1108614>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura forestal*. San José: IICA-GTZ. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=0BfaTECpREEC&oi=fnd&pg=PA2&dq=mensura+forestal&ots=gfF0dceJxk&sig=FfQyo6gMoRwOFMV2qjpAQIID67s#v=onepage&q=mensura%20forestal&f=false>
- Reed, D., & Tomé, M. (1998). Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management*, 103(1), 21–32. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00174-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00174-6)
- Santos, M. F. dos, Filho, A. F., Gama, J. R. V., Retslaff, F. A. de S., Costa, D. L. da, Gomes, K. M. A., Cruz, G. da S., & Almeida, B. R. S. de. (2019). Eficiência de Equações Volumétricas para *Manilkara spp.* Em Floresta Manejada Na Amazônia Oriental. *Nativa*, 7(5), 621–628. <https://doi.org/10.31413/NATIVA.V7I5.7804>
- Sotomayor-Castellanos, J. (2016). *Módulo dinámico de la madera de Pinus pseudostrobus. Evaluación por vibraciones transversales.* | Javier-Ramón Sotomayor Castellanos - *Academia.edu*. Investigación En Ingeniería de La Madera. https://www.academia.edu/28150638/M%C3%B3dulo_din%C3%A1mico_de_la_madera_de_Pinus_pseudostrobus._Evaluaci%C3%B3n_por_vibraciones_transversales
- Subiakto, A., Rachmat, H. H., & Sakai, C. (2016). Choosing native tree species for establishing man-made forest: A new perspective for sustainable forest management in changing world. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 17(2), 620–625. <https://doi.org/10.13057/BIODIV/D170233>
- Talita, C., Carlos, P., Sanquetta², R., Felipe, M., Larissa, N., & Topanotti³, R. (2018). Volume prediction through form factor and regression models by age class for *Pinus taeda* L. *Advances in Forestry Science*, 5(3), 431–436. <https://doi.org/10.34062/AFS.V5I3.6495>

- Tlaxcala-Méndez, R. M., de los Santos-Posadas, H. M., Hernández-de la Rosa, P., & López-Ayala, J. L. (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia* 50. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952016000100089&script=sci_arttext
- Uranga-Valencia, L. P., de Los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., López-Upton, J., & Navarro-Garza, H. (2015). Volumen total y ahusamiento Para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. Total volume and taper for *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. at three forest conditions. *Agrociencia*, 49, 787–801.
- Vásquez-Bautista, N., Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., Romo-Lozano, J. L., Vásquez-Bautista, N., Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., & Romo-Lozano, J. L. (2016). Forest biometric models in Hidalgo, Mexico: state of the art. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(3), 351–367. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2015.09.043>
- Veintimilla, D., Ngo Bieng, M. A., Delgado, D., Vilchez-Mendoza, S., Zamora, N., & Finegan, B. (2019). Drivers of tropical rainforest composition and alpha diversity patterns over a 2,520 m altitudinal gradient. *Ecology and Evolution*, 9(10), 5720–5730. <https://doi.org/10.1002/ECE3.5155>
- West, P. W. (2009). Measurements. *Tree and Forest Measurement*, 5–10. https://doi.org/10.1007/978-3-540-95966-3_2
- Woodall, C. W., Heath, L. S., Domke, G. M., & Nichols, M. C. (2010). *United States Department of Agriculture Methods and Equations for Estimating Aboveground Volume, Biomass, and Carbon for Trees in the*. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-88>
- Wright, J. A., & Wessels, A. (1992). Laboratory scale pulping of *Pinus pseudostrobus*, *P. maximinoi* and *P. patula*. *IPEF International*, 2, 39–44. <https://www.ipef.br/publicacoes/international/nr02cap06.pdf>
- Zobel, B., & Talbert, J. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales* (Limusa, Ed.; Limusa). Limusa.